

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dominik Mihalinec

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Mario Essert, dipl. ing.

Student:

Dominik Mihalinec

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad, na temu simulacije upravljanja magnetskim i ultrazvučnim odstranjivačima kamenca izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr.sc. Mariju Essertu i višem laborantu ing. Zvonku Grgecu što su mi je pružili stručnu pomoć tijekom izrade završnog rada.

Dominik Mihalinec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VII
1. UVOD	1
2. VODENI KAMENAC	2
2.1. Nastanak kamenca	2
2.2. Posljedice nakupina vodenog kamenca	4
3. SELK UREĐAJ	6
3.1. Magnetska obrada vode	6
3.2. Princip rada SELK uređaja	8
3.3. Instalacija uređaja	9
3.4. Programiranje SELK uređaja	10
3.5. Tehničke značajke	12
4. KAVITACIJSKE KADE	13
4.1. Ultrazvuk	13
4.1.1. Prigušenje zvuka	14
4.1.2. Akustična impedancija	15
4.1.3. Rasprostiranje ultrazvuka	16
4.2. Stvaranje ultrazvuka	17
4.2.1. Elektrostrikcija	17
4.2.2. Magnetostricija	19
4.3. Kavitacija	20
4.3.1. Akustična kavitacija	22
4.3.2. Ravnotežni uvijet	24
4.3.3. Dinamika sfernog mjehura	25
4.3.3.1. Rubni i početni uvjeti	25

4.3.3.2.	Rayleigh-Plesset equation	25
4.3.4.	Urušavanje (kolaps) mjehura.....	26
4.3.4.1.	Brzina urušavanja mjehura.....	27
4.3.4.2.	Polje tlaka.....	28
4.4.	Ultrazvučno čišćenje	30
4.4.1.	Karakteristike procesa.....	30
4.4.2.	Princip rada	30
5.	ARDUINO MIKROKONTROLER.....	32
5.1.	Hardver.....	32
5.2.	Arduino softver	33
5.2.1.	Osnovne naredbe setup() i loop().....	33
5.2.2.	Inicijalizacija varijabli	34
5.2.3.	Pisanje uvjetnih naredbi.....	35
5.2.4.	Rad sa petljama	36
5.2.5.	Digitalno komuniciranje	37
5.2.6.	Komunikacija sa analognim komponentama	37
5.2.7.	Serijska komunikacija.....	38
5.3.	Osnovno upravljanje	40
5.3.1.	Processing kod	40
5.3.2.	Arduino kod	42
6.	ZAKLJUČAK.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1.	Kamenac snimljen elektronskim mikroskopom [4].....	3
Slika 2.	Prikaz kamena na električnom grijaču [3]	4
Slika 3.	Raspored temperature po polumjeru (9-r dijagram) [6]	5
Slika 4.	Izvedba sa permanentnim magnetima [8].....	7
Slika 5.	Obrada vode pomoću elektromagnetske indukcije [8]	7
Slika 6.	“In-line”elektroda [8]	8
Slika 7.	Montaža SELKA vijkom na zid [9].....	9
Slika 8.	Montaža jednog, odnosno oba kabla na vodovodnu cijev [9]	10
Slika 9.	Tasteri za izbor cijevi i načina rada [9]	11
Slika 10.	Izbor cijevi i režima rada [9].....	11
Slika 11.	Frekvencijska područja zvuka	13
Slika 12.	Primjer atenuacije (prigušenja) signala [11].....	15
Slika 13.	Refleksija zvuka (ultrazvuka) [13]	16
Slika 14.	Refrakcija zvuka (ultrazvuka).....	17
Slika 15.	Poprečni presjek ultrazvučne sonde [13]	18
Slika 16.	Generiranje ultrazvučnih valova[13]	18
Slika 17.	Generiranje ultrazvuka magnetostrikcijom [16]	19
Slika 18.	Prikaz procesa kavitacije [17].....	21
Slika 19.	Prikaz kavitacijskog mjehura[18].....	22
Slika 20.	Usporedba ciklusa kompresije i ekspanzije sa formiranjem, rastom i implozijom kavitacijskog mjehurića [18].....	23
Slika 21.	Mikromjehur u tekućini[19]	24
Slika 22.	Promjena radijusa $R(t)$ i brzine $R(t)$ tijekom kolapsa [19]	27
Slika 23.	Stvaranje polja tlaka za vrijeme urušavanja mjehura [19]	29
Slika 24.	Ultrazvučne sonde sa piezoelektričnom keramikom [22].....	31
Slika 25.	Ultrazvučna kadica (zapremnina 600 ml) [22]	31
Slika 26.	Arduino Uno pločica [24].....	32
Slika 27.	Električna shema pločice	40
Slika 28.	Processing grafičko sučelje	41

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Opća tvrdoća vode GH [2]	2
Tablica 2.	Različite vrste varijabli [25].....	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
GH	mg/L	Opća tvrdoća vode
ϑ	°C	Temperatura
ϑ_u	°C	Temperatura unutar stijenke
ϑ_u	°C	Temperatura izvan stijenke
ϑ_s	°C	Temperatura stijenke
r	mm	Radijus cijevi
B	T	Magnetsko polje
f	Hz	Frekvencija
λ	m	Valna duljina
v	m/s	Brzina širenja zvuka
A_0	dB	Početna amplituda rasprostirućeg zvučnog vala
A	dB	Reducirana amplituda
α		Koeficijent prigušenja
e		Eulerov broj
x	m	Prijeđena udaljenost
Z	kg/m ² s	Akustična impedancija
ρ	kg/m ³	Gustoća
d	m	Udaljenost objekta od kojeg se reflektira ultrazvučni val
E	Pa	Modul elastičnosti
t	s	Vrijeme
I_r	W/m ²	Intenzitet reflektiranog vala
I_i	W/m ²	Intenzitet upadnog vala
Z_1	kg/m ² s	Akustična impedancija materijala upadnog vala
Z_2	kg/m ² s	Akustična impedancija materijala prenesenog vala
α	°	Kut upadnog vala
β	°	Kut reflektiranog vala
T	K	Temperatura
p_∞	Pa	Tlak u tekućini, izvan mjehura
p_g	Pa	Parcijalni tlak plina unutar mjehura
p_v	Pa	Tlak pare unutar mjehura
S	N/m	Površinska napetost
R	m	Radijus mjehura
R_c	m	Kritični radijus
p_c	Pa	Kritični tlak
t_{rr}	Pa	Naprezanje u smjeru normale

u	m/s	Radijalna komponenta brzine
μ	kg/ms	Dinamička viskoznost fluida
γ		Omjer toplinskih kapaciteta
c_p	J/kgK	Toplinski kapacitet pri stalnom tlaku
c_v	J/kgK	Toplinski kapacitet pri stalnom volumenu
\dot{R}	m/s	Brzina promjene radijusa mjehura
\ddot{R}	m/s	Ubrzanje promjene radijusa mjehura
τ	s	Karakteristično vrijeme kolapsa ili Rayleigh-ovo vrijeme
Π		Bezdimenzijski parametar

SAŽETAK

U radu su opisani fizikalni i kemijski procesi stvaranja i taloženja kamenca. Svaranje taloga vodenog kamenca na svim dijelovima u sustavu vodovodnih instalacija prisutno je više ili manje kod svih potrošača vode. Od malih domaćinstava do velikih industrijskih postrojenja. Štetne posljedice takvih naslaga kamenca su mnogostruke. Rješenje problema leži u sprječavanju stvaranja takvih naslaga (upravljanje magnetskim tokom, npr. Selk uređaj) ili odstranjivanju već postojećih naslaga kamenca (kavitacijske kade). Objašnjeni su principi rada SELK uređaja i ultrazvučnih kada. Kod SELK uređaja radi se o korištenju svojstava magnetskog toka kroz koji struji voda, a kod čišćenja sa ultrazvučnim kadama neophodno je stvaranje kavitacije. Obzirom na to, u radu su ukratko opisani i principi djelovanja magnetskog toka i kavitacije na otopljene molekule kalcijevih i magnezijevih karbonata kao i na postojeći talog vodenog kamenca. Današnji trend je razvitak mikrokontrolerskih uređaja koji upravljaju takvim odstranjivačima. U praktičnom djelu rada načinjeno je osnovno upravljanje simulacijskih modela takvih uređaja uporabom ARDUINO mikrokontrolera.

Ključne riječi: kamenac, kalcijev karbonat, ultrazvuk, ultrazvučne kade, kavitacija, Arduino, Processing

1. UVOD

Završni rad je podijeljen u 5 cjelina u kojima je objašnjen pojedini segment zadane teme. Nakon uvodnog poglavlja, slijedi drugo u kojem su opisani fizikalni i kemijski procesi nastanka i taloženja vodenog kamenca, kao i njegov kemijski sastav i struktura. Poznavanje tih elementarnih stvari olakšava nam razumijevanje procesa odstranjivanja takvih naslaga i sličnih nečistoća. Uz to, navedene su i moguće posljedice u obliku štete koja može nastati uslijed takvih taloženja. Treća cjelina sadrži objašnjenja magnetske obrade vode. Princip magnetske obrade vode koristi SELK uređaj, koji je zadnjih godina vrlo popularan u sprečavanju nastanka kamenca i u odstranjivanju već nastalih nakupina u kućanstvima i industriji. Četvrta cjelina započinje sa osnovnim podacima o ultrazvuku i o načinu stvaranju ultrazvuka. Nakon toga dolazimo do kavitacije, drugom vrlo popularnom metodom u odstranjivanju kamenca i nečistoća. Kraj četvrte cjeline objašnjava način na koji su ultrazvuk i kavitacija povezani u procesu ultrazvučnog čišćenja. Peta, ujedno i posljednja cjelina sadrži praktični dio rada koji se sastoji od osnovnog upravljanja simulacijskog modela gore navedenih uređaja. Takvo upravljanje se izvršava pomoću vrlo popularnog Arduino mikrokontrolera, koji je usko povezan sa Processingom u kojem je napravljeno grafičko sučelje.

2. VODENI KAMENAC

U drugoj cjelini opisani su osnovni fizikalni i kemijski procesi stvaranja i taloženja kamenca. Zbog ograničenosti vremenom nije bilo moguće ići u detaljniju analizu tih procesa. Navedeni su još i najčešći problemi i kvarovi prouzročeni taloženjem vodenog kamenca na stijenkama vodovodnog sistema.

2.1. Nastanak kamenca

Nastanak vodenog kamenca na stjenkama vodovodnih sistema ovisi o mnogim procesima. Najbitnija su sljedeća tri: pH vrijednost vode, temperatura i tlak u vodi jer topljivost minerala-uzročnika kamenca upravo ovisi o tim parametrima. Topljivost kalcijevog karbonata se smanjuje sa porastom pH vrijednosti i temperaturom vode, a raste sa smanjenjem tlaka u vodovodnom sistemu. Čak i kada bi se ti parametri : pH vrijednost, temperatura i tlak podesili u vodovodnim sistemima na način da se poveća topljivost minerala koji uzrokuju kamenac, elektrostatična Columbova sila između otopljenih iona i metalne površine stijenke će te minerale pritisnuti uz stijenku. Iz tog je razloga vodeni kamenac ponekad neizbježan bez odgovarajuće preventivnih mjera. [8]

Tvrdoća vode nam govori o sadržaju u vodi otopljenih soli kalcija i magnezija. Kalcij i magnezij se u prirodnim vodama nalaze u obliku hidrogenkarbonata, sulfata, klorida i nitrata. Tvrdi voda koju koristimo za piće generalno nije opasna po naše zdravlje, ali može prouzročiti ozbiljna oštećenja u industrijskim pogonima i kućanstvima. Vode koje ostavljaju jak talog nazivaju se tvrdim vodama i sadrže visoke udjele iona kalcija Ca^{+2} i magnezija Mg^{+2} . Opća tvrdoća vode (GH) izražava se u stupnjevima tvrdoće ($^{\circ}$ DH). Oznaka DH podrazumjeva “stupanj tvrdoće”, dok oznaka ppm označava “količina na milijun”, što predstavlja ekvivalent mg/Litru vode. 1 DH je jednako 17.8 ppm CaCO_3 . [1]

Tablica 1. Opća tvrdoća vode GH [2]

0-4 DH	0-70 mg/L	Jako mekana
4-8 DH	70 – 140 mg/L	Mekana
8-12 DH	140 – 210 mg/L	Srednje mekana
12-18 DH	210 – 320 mg/L	Tvrda
18-30 DH	320 – 530 mg/L	Jako tvrda

Pri grijanju vode dolazi do remećenja kemijske ravnoteže i izdvajanja taloga:



U sustavima grijanja, na mjestima snažne izmjene topline dolazi do jakog taloženja i stvaranja čvrstih naslaga na stjenkama kroz koje se izmjenjuje topline (npr. cijevni električni grijači vode u strojevima za pranje rublja, cijevi parnih kotlova, bojleri). Taloženje kamenca nastaje složenim fizikalno-kemijskim procesom, kristalizacijom. Vodeni kamenac se uglavnom sastoji od kalcijevog i magnezijevog karbonata, ali taloženjem ti karbonati povlače za sobom i ostale soli, tako da se u sastavu kamenca mogu naći i natrijev klorid (NaCl), natrijev nitrat (NaNO_3), kalijev nitrat (KNO_3), kalijev sulfat (K_2SO_4). Sastav kamenca ovisi o kemijskom sastavu vode kao i o fizikalno-kemijskim procesima koji se odvijaju u vodi. [4]. CaCO_3 ima tri različita polimorfna oblika i svaka pokazuje različita fizička, a donekle i kemijska svojstva : kalцит, aragonit i vaterit.

Kod vodenog kamenca se uglavnom pojavljuju kalцит i aragonit. Kalцит se stvara pri manjim temperaturama (ispod 30°C), lako se odstranjuje uz pomoć slabe kiseline, manje je adheziv od aragonita i ima heksagonalnu kristalnu rešetku. Aragonit se formira pri višim temperaturama (iznad 30°C), teže ga je odstraniti i ima rombsku kristalnu rešetku. Aragonit je posebno opasniji od kalцita jer formira tvrđe i gušće naslage od kalцita. Na temperaturi iznad 30°C kalcijev karbonat se formira i obliku aragonita (~80%) i kalцita (~20%). Na temperaturi nižoj od 30°C , kalcijev karbonat formira se u obliku kalцita. Ove činjenice mogu biti zbunjujuće zbog toga što su neke kompanije u svojim komercijalnim brošurama opisivale kalцит kao tvrdi mineral od aragonita, što se pokazalo krivim.[8]



Slika 1. Kamenac snimljen elektronskim mikroskopom [4]

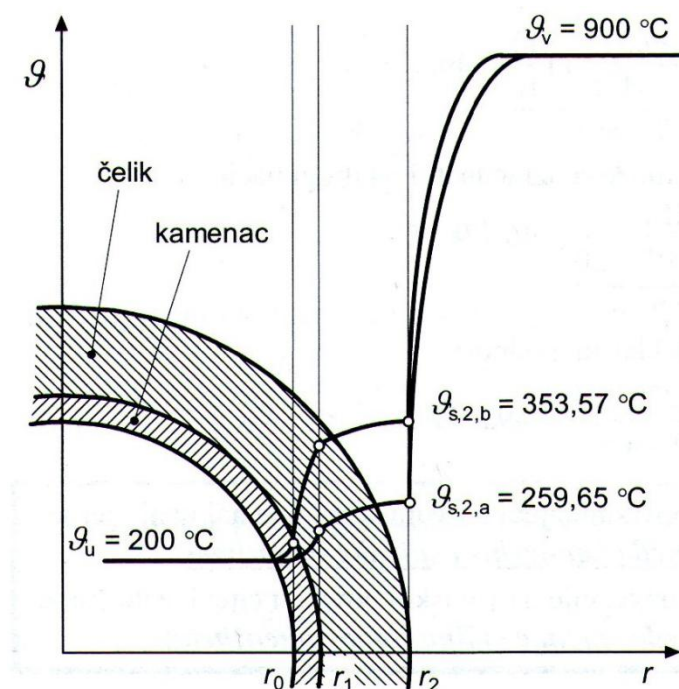


Slika 2. Prikaz kamenca na električnom grijaču [3]

2.2. Posljedice nakupina vodenog kamenca

Posljedice uzrokovane nakupinama vodenog kamenca mogu biti mnogostruke, nabrojane su neke od njih:

- Povećana potrošnja energije, jer svega 3 mm kamenca na grijačima uzrokuje oko 25 % veći trošak energije.
- Ometanje pravilnog toka vode uslijed smanjenja poprečnog presjeka
- Veći troškovi održavanja vodovodnih instalacija i uređaja
- Smanjena sigurnost pogona i smanjen vijek trajanja uređaja
- Povećana upotreba sredstva za pranje i čišćenje
- Potrebno je više vremena za čišćenje slavina, sudopera, umivaonika, kada, keramičkih pločica...
- Smanjena kvaliteta vode
- Stvaranje korozije
- Štetnost za prirodu (npr. zbog veće potrošnje energije i povećanog korištenja sredstva za pranje) [5]



Slika 3. Raspored temperature po polumjeru (θ - r dijagram) [6]

Slika 3. prikazuje raspored temperature cijevi po poprečnom presjeku za slučaj kada na unutrašnjoj površini cijevi postoji nakupina vodenog kamenca debelog 1 mm i bez njega. Sa unutrašnje strane cijevi je voda, a sa vanjske su dimni plinovi. Kamenac na unutrašnjoj površini cijevi predstavlja dodatni toplinski otpor provođenju, što ima za posljedicu smanjenje izmjenjivanog toplinskog toka. Budući da je taj sloj kamenca na strani hladnijeg fluida, njime je otežano hlađenje čelične stijenke cijevi, pa je njena temperatura viša nego u slučaju bez nakupine kamenca. [6]

Također je iz slike vidljivo da je nakupina vodenog kamenca od samo 1 mm, prouzročila razliku u temperaturi cijevi od oko 100 °C. Povišenje temperature stijenke znači smanjenje njene čvrstoće, što je vrlo opasno kod posuda pod tlakom. Iz toga se još jednom vidi važnost sprječavanja nastanka kamenca. Budući da otopivost mineralnih tvari u void opada sa porastom temperature, kamenac će se “hvatati” na toplim plohama koje su dodiru s takvom vodom.

3. SELK UREĐAJ

Uređaj SELK dizajniran je kao efikasno sredstvo protiv taloženja naslaga vodenog kamenca u sustavu vodovodne instalacije i postupnog uklanjanja već postojećih. SELK je razvijen na bazi mikroprocesorske tehnologije koristeći fizikalne i kemijske spoznaje o ponašanju vodenog kamenca. Ugrađeni mikropcesor kontrolira optimalno funkcioniranje uređaja, omogućuje vrlo laki odabir traženih parametara i povremeno ispituje vlastitu djelotvornost (autodijagnostika). Tretiranje tekuće vode obavlja se bez uporabe bilo kakvih kemijskih dodataka ili rezanja vodovodnih cijevi. Montaža je vrlo brza i jednostavna, a potrošnja električne energije iznosi približno 1KWh na mjesec (financijski je to mjesečno manje od 1 kn).

SELK je predviđen za ugradnju na pocinčane, bakrene ili plastične cijevi, uz dva načina rada. Nadalje, vrlo neugodno ljuštenje komadića hrđe sa starih vodovodnih cijevi (najčešće u sustavu tople vode), SELK u velikoj mjeri smanjuje, bez štetnog utjecaja na okoliš ili tretiranu vodu. Dapače, iskustva su pokazala da je voda tretirana uređajem SELK ukusnija i zdravija za piće, a biljne kulture zalijevane tretiranom vodom davale su više plodova, uz značajan efekt desalinizacije tla.

Uporabom SELKA se produžuje radni vijek kućanskih aparata, smanjuju se troškovi održavanja grijača u sustavu grijanja sanitarne vode, troši se značajno manje energije za iste toplinske učinke, održavanje čistoće sanitarija mnogo je lakše i brže uz manju potrošnju raznih čistila i deterdženata. Ovdje se još jednom vide prednosti fizikalnog tj. magnetskog tretiranja vode. [9]

3.1. Magnetska obrada vode

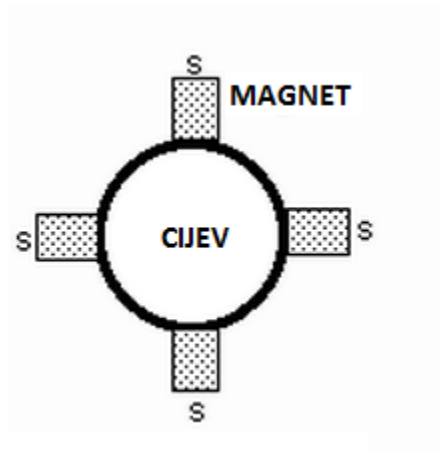
Magnetska obrada vode (eng. magnetic water treatment) je metoda koja na fizikalni način omekšava vodu i time sprječava nastanak vodenog kamenca. Formiranje CaCO_3 kristala ima tendenciju podvrgavanja selektivnoj adsorpciji nekoliko različitih vrsta iona. Što zapravo znači da na svojoj graničnoj površini veže (adsorbira) otopljene tvari iz vode, formirajući tako molekularni film kojeg zovemo adsorbat tj. izaziva stvaranje naslaga vodenog kamenca. Magnetska obrada vode (MOV) uzrokuje formiranje CaCO_3 čestica koje se ne mogu taložiti na stijenkama vodovodnih cijevi i drugim djelovima vodovodnog sustava već slobodno prolaze vodenim tokom. Iz tog razloga MOV je postala alternativna metoda kemijskim metodama obrade vode. Postoje mnogi magnetski i elektromagnetski uređaji za zaštitu od stvaranja vodenog kamenca u domaćinstvima i u industrijskim pogonima. [7]

Za razliku od kemijskog omekšavanja vode, magnetska obrada nema direktan kemijski učinak na vodu. Magnetsko polje mijenja morfologiju (oblik i građu) i otežava adheziju kalcijevih karbonata. Faktori koji najviše utječu na magnetno-hidrodinamičke sile odgovorne za promjene kristalnih struktura su brzina i način strujanja fluida (laminarno ili turbulentno).

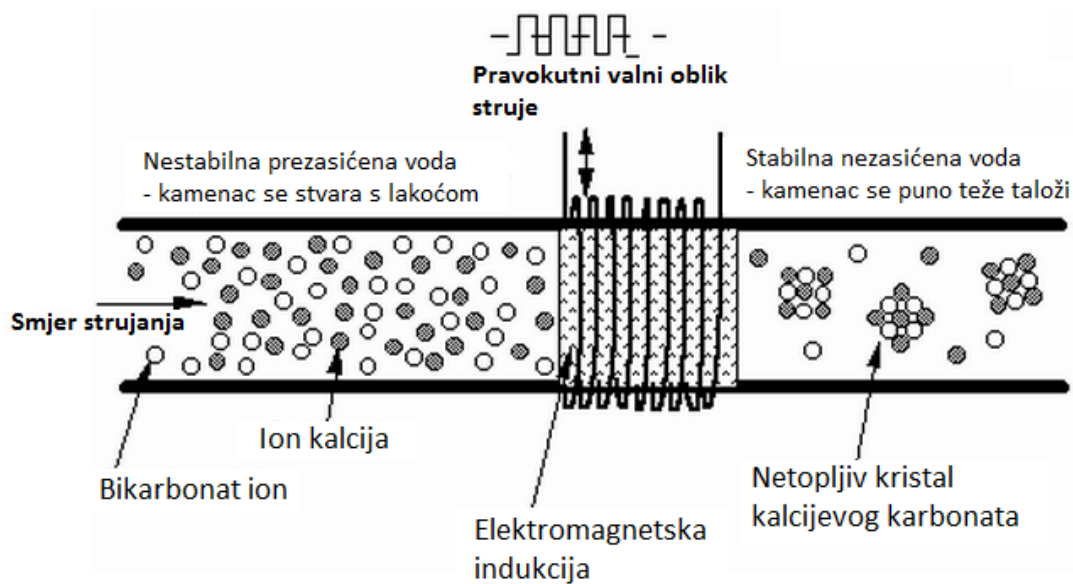
Daljnja su istraživanja pokazala da provodnost tekućine i gustoća magnetskog toka također utječu na te sile. Čak će i slabo magnetsko polje ($B = 0.1 \text{ T}$) utjecati na tvrdoću naslaga CaCO_3 u vodi. [7]

Najviše uređaja za fizikalnu obradu vode može se podijeliti u tri kategorije:

- Permanentni magneti
- Indukcijski uređaji (elektromagnetska indukcija)
- „In-line“ elektrode

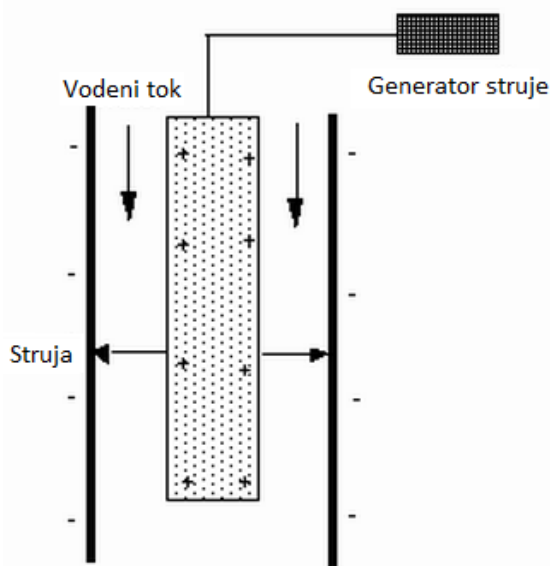


Slika 4. Izvedba sa permanentnim magnetima [8]



Slika 5. Obrada vode pomoću elektromagnetske indukcije [8]

Uređaji sa “In-line” elektrodom koriste dugačku elektrodu smještenu u središtu cijevi. Oni također koriste impulsnu istosmjernu struju između centra elektrode i stijenke. Ovdje je voda u neposrednom dodiru sa elektrodom i tim djelom stijenke. Kod “In-line” tehnologije se javljaju određene poteškoće kao na primjer rezanje postojeće cijevi zbog ugradnje electrode i potrebnog djela stijenke. “In-line” tehnologija koristi neki od sljedećih principa: elektromagnetizam, elektrostatiku, elektroniku ili ultrazvuk. Sva 4 principa imaju pozitivan učinak na formiranje kristala. Elektrostatski princip koristi veći napon nego elektronski.



Slika 6. “In-line” elektroda [8]

3.2. Princip rada SELK uređaja

Vodeni kamenac po svojoj kristalnoj strukturi ima odličnu sposobnost međusobnog vezivanja i vezivanja na strana tijela (efekt “čička”), što u konačnici rezultira stvaranjem neželjenih i štetnih naslaga. Najnovije znanstvene spoznaje pokazale su da se efekt “čička” u kamencu može eliminirati ukoliko prolazi kroz promjenjivo električno polje određenih frekvencija i odgovarajuće moduliranog signala. Prijenos takvog polja na vodu izveden je kapacitivnim putem preko zavojnica na cijevi, što rezultira oslobađanjem male količine ugljičnog dioksida iz kalcijevog karbonata. Taj postupak ima za posljedicu promjenu kristalne strukture kamena i umanjivanje sposobnosti međusobnog vezivanja (nestanak efekta “čička”). Temperatura tretirane vode ne utječe na djelovanje SELKA, dapače, rekristalizacija kamena lakša je na povišenim temperaturama. U konačnici kristali vodenog kamena dobivaju oblik štapića koji slobodno plutaju u vodi bez sposobnosti zajedničkog vezivanja i stvaranja neželjenih naslaga.

Vodeni kamenac u vodi tretiranoj uređajem SELK izgubio je ključnu sposobnost međusobnog vezivanja. Taj učinak se može lako primjetiti na stjenkama tuš kabina na kojima će ostajati mnogo manje vodenih mrlja nego ranije. Takve zaostale mrlje sad će se mnogo lakše moći odstraniti, praktički uz neznatnu upotrebu sredstva za čišćenje i smanjenja onečišćenja okoliša. Mrežice na slavinama (perlatori) neće se više začepljivati i cijeli sanitarni lanac biti će čišći. Ukoliko u cijevima postoje stare naslage kamenca, zbog djelovanja SELKA doći će do postupnog skidanja taloga čiji će se djelići zaustavljati na mrežicama (to je dobar znak), pa je dovoljno ponekad odviti mrežicu i istresti stare nakupine, tako dugo dok se cijevi potpuno ne očiste od starih naslaga. Važno je napomenuti da će svi grijači u sustavu vodovodne mreže s vremenom biti očišćeni tako da će korištenje soli za perilice suđa biti nepotrebno, što je još jedna dodatna ušteda u nizu.

Kod starijih vodovodnih cijevi (pogotovo za toplu vodu) pojavljuje se pojava ljuštenja djelića rđe koja vrlo često može začepiti rupe slavina i tako zatvoriti dovod tople vode. Korištenjem SELKA ljuštenje stare rđe smanjuje se do nivoa vrlo sitnih čestica koje su potpuno neopasne za začepljivanje bilo ventila, bilo rupa slavina. [9]

3.3. Instalacija uređaja

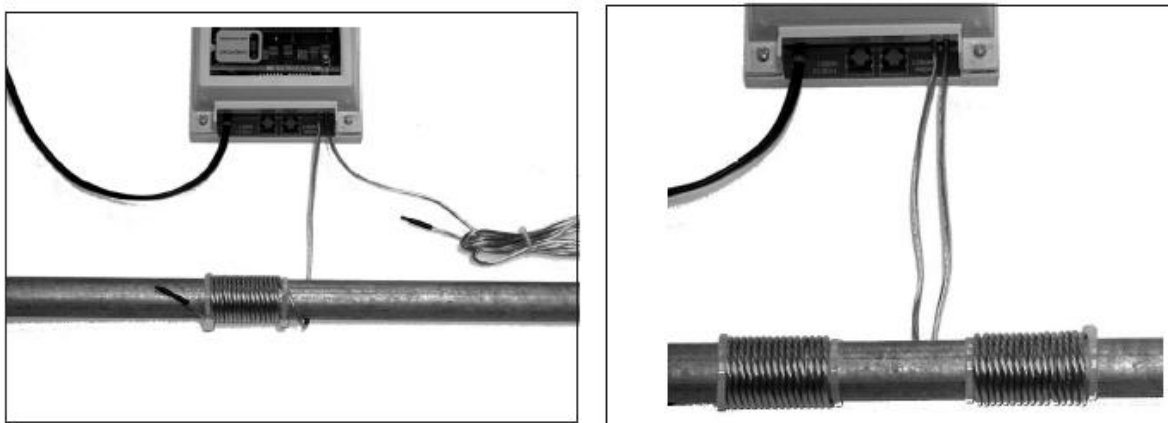
SELK je najbolje montirati na cijev na hladnu vodu na ulazu u stambeni objekt. Ovaj tip SELK uređaja na slici 7, može se koristiti za promjere cijevi od 25 mm – 1 col. Nadalje, potrebno je u blizini imati priključak za električnu mrežu napona 220 V.



Slika 7. Montaža SELKA vijkom na zid [9]

Udaljenost SELKA od cijevi ne bi trebala biti veća od 40 cm, zbog ograničene duljine priloženih kablova. Kablovi se montiraju na način da se do kraja omotaju oko vodovodne cijevi i

u tom položaju pričvrste vezicama. Na raspolaganju su dva kabla i oba se trebaju pričvrstiti na taj način, pazeći pritom da zavojnice međusobno ne budu bliže od 5 cm i SELK je spreman za priključivanje na električnu mrežu preko mrežnog kabla. Na slici 8 je prikazana montaža jedne, odnosno obje zavojnice na vodovodnu cijev. Cijev može biti postavljena vodoravno ili okomito.

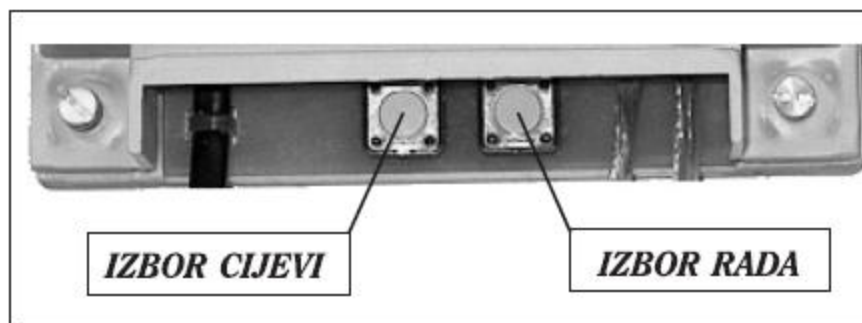


Slika 8. Montaža jednog, odnosno oba kabla na vodovodnu cijev [9]

Neposredno poslije priključivanja na mrežu, na zaslonu (display-u) uređaja, ispisat će se poruka „pocinčana cijev“, koju će nakon otprilike jednu sekundu zamjeniti poruka „normalni rad“. Poslije toga kroz zaslon će „putovati“ strelica koja simbolično prikazuje protok vode. Ovako postavljene parametri tvornički su definirani i mogu se lako mijenjati prema potrebi i želji korisnika. Pokraj oznake „UKLJUČENO“ svijetlit će crvena svjetiljka koja pokazuje prisutnost električne energije, a uz oznaku „INDIKATOR“ svijetlit će zelena LED – dioda. Uloga LED – diode bit će naknadno objašnjena.

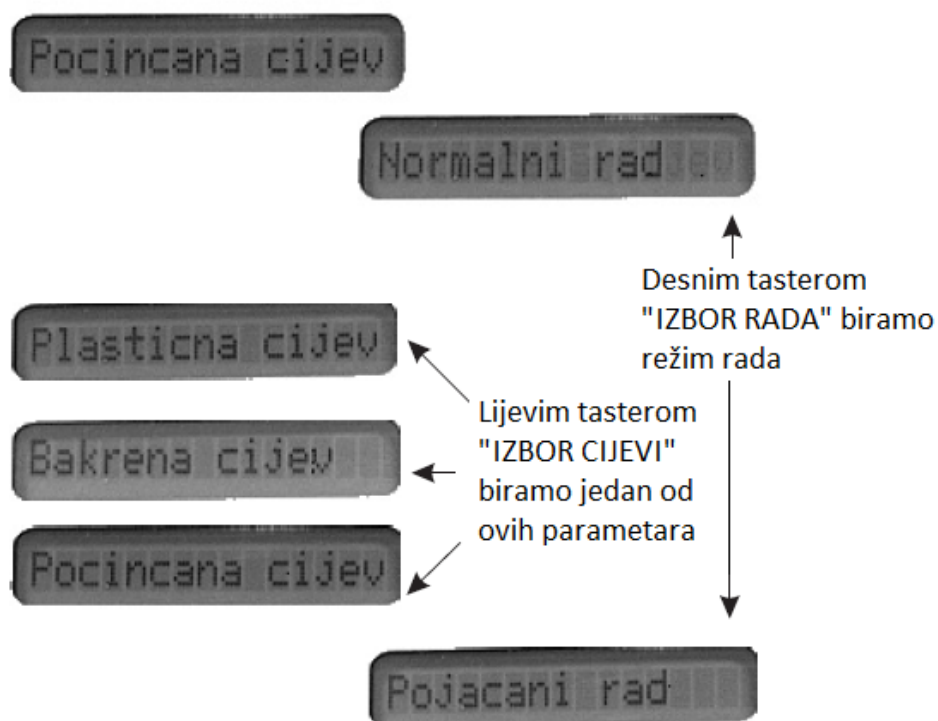
3.4. Programiranje SELK uređaja

Na slici 9 vide se dva tastera s pripadajućim oznakama „IZBOR CIJEVI“ kod lijevog tastera i „IZBOR RADA“ kod desnog. Poslije priključivanja SELKA na električnu mrežu na zaslonu će biti ispisana poruka „Pocinčana cijev“ i malo kasnije „Normalni rad“. Kraćim pritiskom na taster za izbor materijala na zaslonu će se prikazati poruka „Bakrena cijev“, odnosno poslije sljedećeg pritiska poruka će biti „Plastična cijev“. Ukoliko je cijev od pocinčanog željeza, nije potrebno mijenjati vrstu materijala i obratno. Desni taster omogućuje izbor rada normalni ili pojačani. Za starije vodovodne mreže u kojima postoje stare naslage kamenca, koristit će se opcija „pojačani rad“. Nakon 4-8 mjeseci pojačanog rada cijevi će biti očišćene i SELK se može reprogramirati na režim „normalni rad“, koji bi trajno trebao biti u upotrebi.



Slika 9. Tasteri za izbor cijevi i načina rada [9]

Poslije nestanka električne energije, SELK je potrebno reprogramirati na željene vrijednosti. Reprogramiranje nije potrebno ukoliko su željeni parametri „Pocincana cijev“ i „Normalni rad“, jer su te vrijednosti početno (tvornički) postavljene.



Slika 10. Izbor cijevi i režima rada [9]

Kod SELK uređaja, programski je određeno da nakon određenog vremena ispituje sam sebe i u slučaju besprijekornog rada ispiše poruku „Izvršno radi“. Ukoliko je došlo do bilo kakvog kvara, na zaslonu se ispiše poruka o vrsti kvara, a zelena svjetiljka (LED dioda) počinje žmirkati, što omogućava laku zamjetnost eventualnog nastalog kvara. Za samostalno provjeravanje

ispravnosti uređaja dovoljno je istovremeno pritisnuti oba tastera, poslije čega će se na zaslonu pojaviti poruka „Dijagnostika -“. Nakon otprilike dvije sekunde, kada je proces ispitivanja završen, na zaslonu će biti ispis „Izvršno radi“ ili u protivnom opis kvara. Kada dođe do kvara, SELK kontinuirano ispituje vlastitu ispravnost i uz odgovarajuće poruke uvijek iznova ulazi u proces ispitivanja uz treperenje zelene svjetiljke „INDIKATOR“. Ukoliko je kvar bio kratkotrajan (njihanje električnog napona, atmosferska pražnjenja, nehotičan kratki spoj izlaznih kablova ili slično), SELK će nakon poruke „Uređaj nije OK“ ponovno ući u proces dijagnostike i ukoliko je uzrok greške nestao, pojavit će se poruka „Izvršno!! Radi!“ bez daljnjeg treperjenja svjetiljke „INDIKATOR“. [9]

3.5. Tehničke značajke

- Priključni napon: 220/50 Hz
- Potrošnja električne energije: 1.5 VA
- Kapacitet protoka: do 5m³/h
- Mikroprocesor: PIC 16c57
- Raspon frekvencija: 2 – 18 kHz

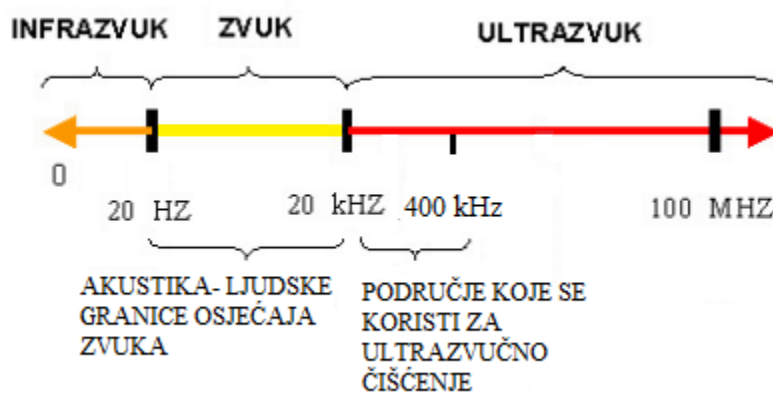
4. KAVITACIJSKE KADE

U četvrtoj cjelini opisan je princip rada kavitacijskih kada. Osnova za razumijevanje ultrazvučnog odstranjivanja kamenca u kavitacijskim kadama je poznavanje osnovnih definicija i specifičnosti, kao i fizikalnih zakona ultrazvuka i kavitacije.

4.1. Ultrazvuk

Zvuk je ljudska percepcija nestalnih podražaja nastalih kao posljedica promjene razine tlaka koja se širi elastičnim medijem u kojemu se nalazi i slušatelj. Te promjene tlaka nastaju zbog titranja molekula medija (zrak, voda) koje su zbog vanjskog utjecaja (sile) izbačene iz ravnotežnog položaja. Zvuk se širi zbog elastične veze među molekulama medija. U plinovima i tekućinama valovi zvuka su isključivo longitudinalni (tj. šire se u istom pravcu u kojem se gibaju čestice medija pri titranju), dok u čvrstim tijelima valovi mogu biti također transverzalni, tj. čestice medija mogu titrati i okomito na pravac širenja vala. Zvuk se ne može širiti kroz vakuum.

Zvučni val se kroz različite medije kreće različitim brzinama. U zraku, taj se val, kreće brzinom od približno 300 m/s, u vodi se kreće približnom brzinom od 1500 m/s, a u željeznoj žici oko 5000 m/s. Što je materijal gušći, to se zvuk kroz njega prenosi duže i brže. Zvuk je određen, kao i ostali valovi, dvjema fizikalnim veličinama, frekvencijom i valnom duljinom. Broj titraja koje materijal čini u jednoj sekundi se naziva frekvencija, oznaka je f , a mjerna jedinica Hz (Herc).[10]



Slika 11. Frekvencijska područja zvuka

Ultrazvuk je dio tog zvučnog spektra. Njegova je frekvencija iznad područja čujnog ljudskom organizmu. Ultrazvučni valovi su u većini slučajeva longitudinalni valovi. Najčešća

frekvencijska područja uporabe ultrazvuka su između 20 kHz i 10 MHz. A za potrebe ultrazvučnog čišćenja kamenca uglavnom između 20 kHz i 400 kHz. Ultrazvuk se kroz određeni medij širi na dva osnovna načina – kao longitudinalni val ili kao transverzalni val. Najpoznatija upotreba ultrazvuka je u medicini (ultrazvučna dijagnostika, terapijska djelovanja...), vojsci, ribarstvu, no koristi se i u mnoge druge svrhe. Ultrazvuk se može proizvesti mehaničkim putem, npr. različitim „sviralama“. No, mnogo češći i efikasniji način je električko stvaranje ultrazvuka odgovarajućim pretvaračima. Oni rade na magnetostriksijskom ili piezoelektričnom principu i napajani su iz odgovarajućih elektroničkih generatora. [10]

Neka od osnovnih svojstava zvuka koji se širi kroz određeni medij su njegova valna duljina (λ), frekvencija i brzina. Valna duljina je direktno proporcionalna brzini zvuka i obrnuto proporcionalna frekvenciji zvuka. Njihov međusobni odnos je prikazan u jednadžbi (3):

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3)$$

$\lambda \rightarrow$ valna duljina [m]

4.1.1. Prigušenje zvuka

Kada zvuk putuje kroz neki medij, njegov intenzitet slabi sa udaljivanjem od izvora. Signal se reducira po svojoj amplitudi (intenzitetu). To prigušenje nastaje zbog raspršivanja zvučnog vala u smjerove različite od originalnog i absorpcije. Absorpcija zapravo znači pretvaranje energije zvuka u neke druge oblike. Zajednički utjecaj raspršivanja vala i absorpcije zove se atenuacija ili prigušenje. Vrijednost amplitude prikazana je donjim izrazom i smanjuje se eksponencijalno :

$$A = A_0 e^{-\alpha x} \quad (4)$$

gdje je :

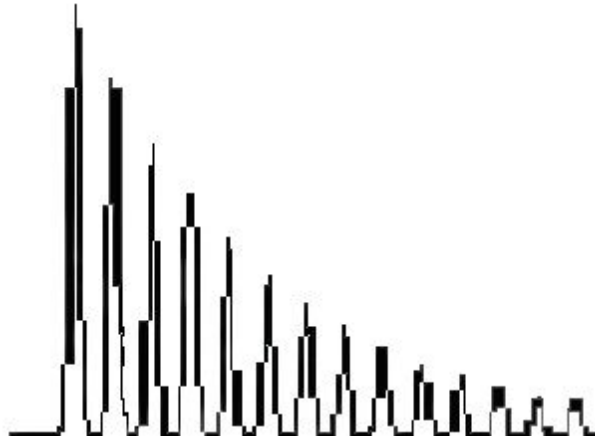
$A_0 \rightarrow$ početna amplituda rasprostrućeg zvučnog vala [dB]

$A \rightarrow$ reducirana amplituda nakon što je val prešao udaljenost x od početne točke [dB]

$\alpha \rightarrow$ koeficijent prigušenja

$e \rightarrow$ Eulerov broj, ≈ 2.71828

Svaki materijal ima drugačiju vrijednost atenuacijskog koeficijenta.[11]



Slika 12. Primjer atenuacije (prigušenja) signala [11]

4.1.2. Akustična impedancija

Akustična impedancija (Z) definirana je kao umnožak gustoće medija kroz koji zvuk prolazi i njegove brzine (v).

$$Z = \rho \cdot v \quad (5)$$

Za zvuk vrijede i slijedeći izrazi:

$$d = v \cdot t; \quad v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}; \quad (6)$$

gdje su:

$Z \rightarrow$ akustična impedancija [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

$v \rightarrow$ brzina rasprostiranja zvuka u mediju [m/s]

$\rho \rightarrow$ gustoća [kg/m^3]

$d \rightarrow$ udaljenost objekta od kojeg se reflektirao ultrazvučni val [m]

$E \rightarrow$ modul elastičnosti [$\text{Pa}=\text{Nm}^2$]

$t \rightarrow$ vrijeme [s]

Akustična impedancija važna je pri [11]:

- određivanju akustične transmisije i refleksije na granici dvaju materijala različitih akustičnih impedancija

- konstrukciji ultrazvučnih pretvornika (sondi)
- procijeni apsorpcije zvuka unutar medija

Pojmovi transmisij, refleksije i apsorpcije su objašnjeni u sljedećem poglavlju.

4.1.3. Rasprostiranje ultrazvuka

Zakon refleksije

Kod prijelaza ultrazvuka iz jednog medija u drugi doći će do djelomične refleksije ultrazvuka ako mediji nisu jednake impedancije, a dio će se ultrazvučne energije prenijeti u drugi medij.

Intenzitet reflektiranog vala računa se prema sljedećem izrazu [12]:

$$I_r = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right|^2 \cdot I_i \quad (7)$$

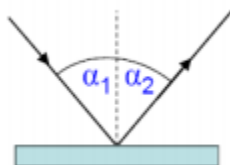
gdje je :

$I_r \rightarrow$ Intenzitet reflektiranog vala [W/m^2]

$I_i \rightarrow$ Intenzitet upadnog vala [W/m^2]

$Z_1 \rightarrow$ Akustična impedancija materijala upadnog vala [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

$Z_2 \rightarrow$ Akustična impedancija materijala prenesenog vala [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]



Slika 13. Refleksija zvuka (ultrazvuka) [13]

Zakon refrakcije

Zakon refrakcije ili loma definiran je sljedećim izrazom [12]:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (8)$$

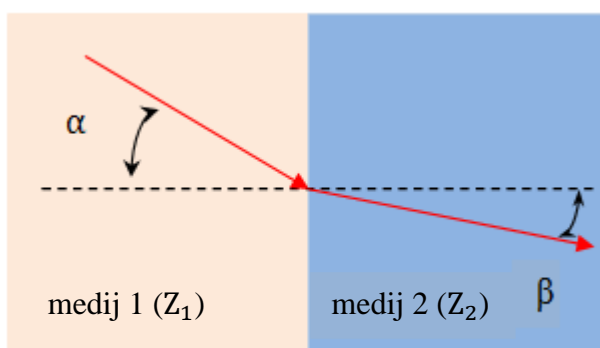
gdje je :

$\alpha \rightarrow$ kut upadnog vala [$^\circ$]

$\beta \rightarrow$ kut reflektiranog vala [$^{\circ}$]

$Z_1 \rightarrow$ Akustična impedancija materijala upadnog vala [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]

$Z_2 \rightarrow$ Akustična impedancija materijala prenesenog vala [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]



Slika 14. Refrakcija zvuka (ultrazvuka)

Prema Snellovom zakonu veza između kuteva i brzine širenja ultrazvučnih valova je [14]:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} \quad (9)$$

4.2. Stvaranje ultrazvuka

Ultrazvuk se može generirati [13]:

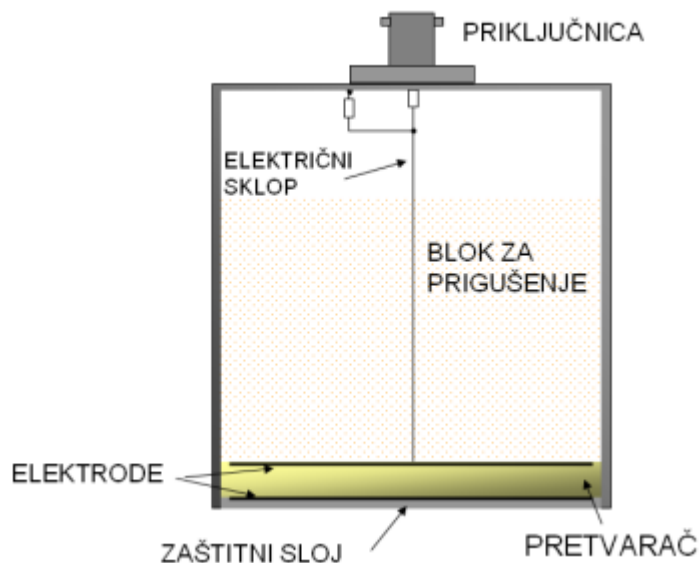
- Pomoću piezoelektričnih pretvarača
- Pomoću magnetostrikcijskih pretvarača
- Mehaničkom pobudom
- Toplinskom pobudom
- Elektrostatski
- Elektrodinamički

4.2.1. Elektrostrikcija

Najrasprostranjeniji generator ultrazvuka je kvarcni generator, čiji je rad zasnovan na tzv. piezoelektričnom efektu. To je pojava kada se na nekim kristalima (kvarc, turmalin i dr.), pogodno odrezanima, javlja električna polarizacija kada se silom izvrši elastična deformacija. Umjesto da se djeluje silom, može se postići i obrnuti efekt - elektrostrikcija, stavljanjem pločica u izmjenično električno polje vrlo visoke frekvencije. Kada se frekvencija izmjeničnog napona poklopi sa svojstvenom (vlastitom) frekvencijom kvarcne pločice, nastupa rezonancija. Uslijed

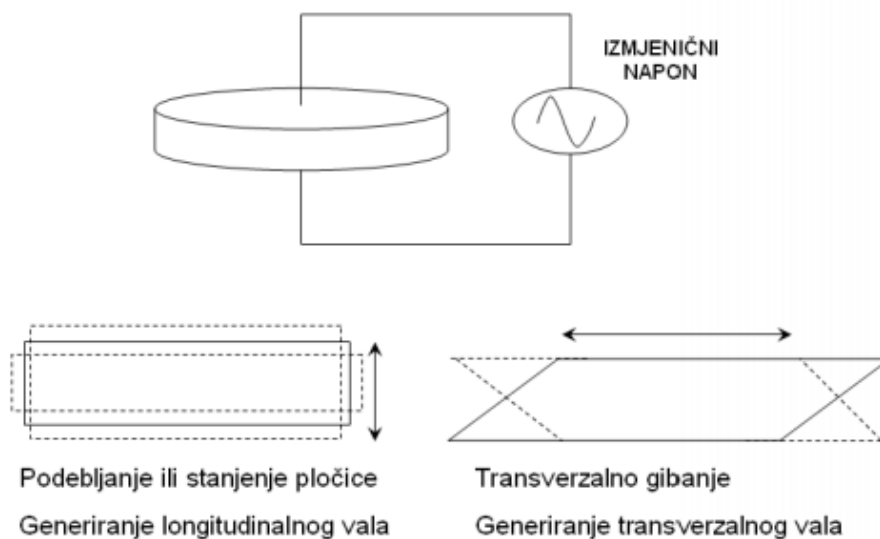
rezonancije, pločica jako titra i proizvodi ultrazvučne valove znatne amplitude. Upotrebom turmalina mogu se dobiti ultrazvučni valovi i do nekoliko stotina MHz.[15]

Aktivni element koji je piezo ili fero električni materijal pretvara električnu energiju, npr. električni impuls u mehaničko titranje.[13]



Slika 15. Poprečni presjek ultrazvučne sonde [13]

Pretvarač je pločica u obliku diska ili kvadra. Ovisno o načinu rezanja pločice u odnosu na kristalografske osi, dobivaju se pretvarači koji različito titraju – proizvode različite vrste valova.

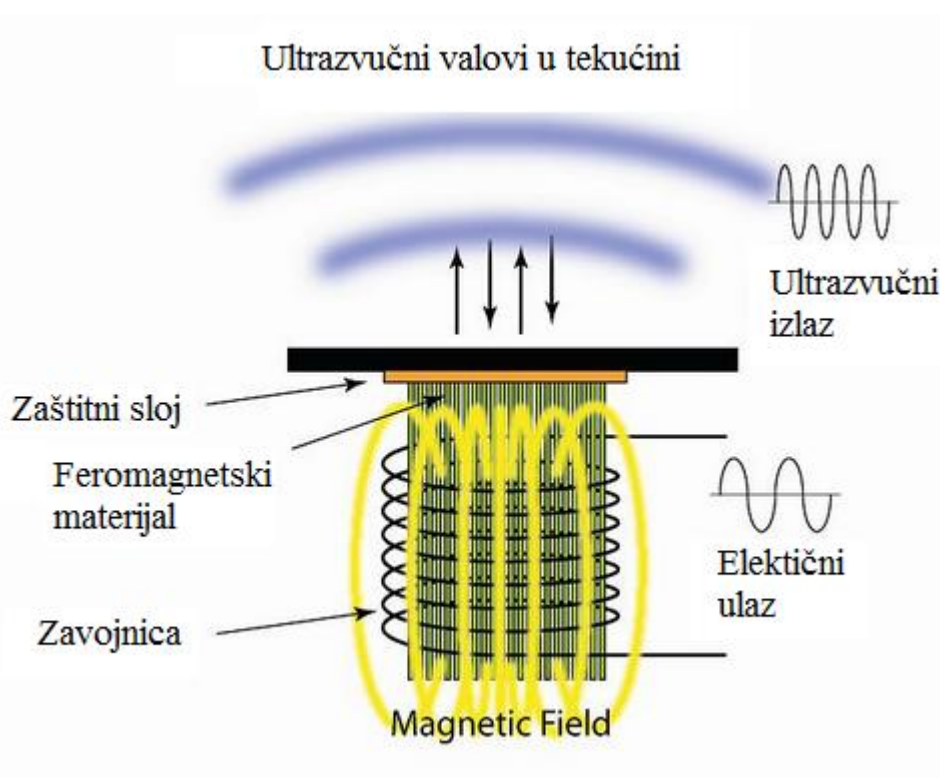


Slika 16. Generiranje ultrazvučnih valova[13]

4.2.2. Magnetostrikcija

Ova metoda dobivanja ultrazvuka zasnovana je na svojstvu feromagnetnih materijala da djelovanjem magnetskog polja mijenjaju dimenziju (željezo, kobalt, nikal itd.). Magnetostrikcija je odgovorna za zvuk kojega proizvode transformatori i drugi uređaji sa željeznim jezgrama koji rade na izmjeničnu struju. To je slična pojava piezoelektričnom efektu. Ovi se materijali u jačem magnetskom polju uglavnom skraćuju, te je ova pojava nazvana magnetostrikcijom (strictura – stezanje, sužavanje). Ako se kratak štap od ovih materijala nalazi u promjenjivom magnetskom polju, onda se dovodi u rezonantno longitudinalno titranje, kad se kroz elektromagnet propušta izmjenična struja odgovarajuće frekvencije. [15]

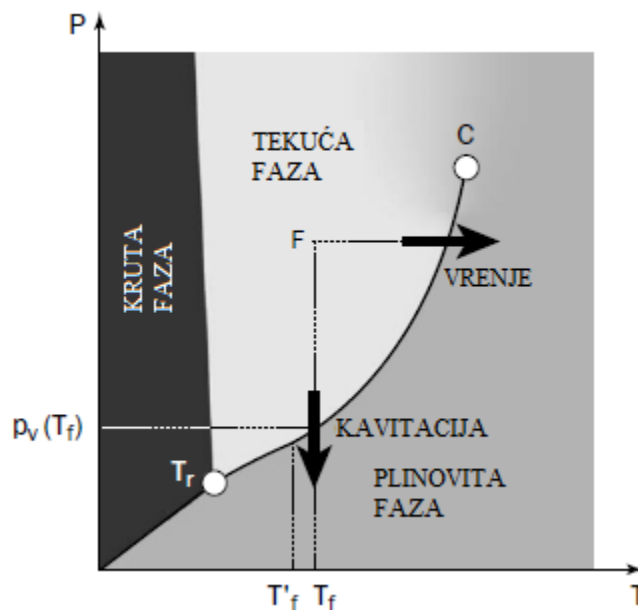
Magnetostrikcija je prvo iskorištena za dobivanje ultrazvuka. Ultrazvuk se ranije dobivao titranjem piezoelektričnih kristala, pobuđivanih elektroničkim oscilatorima. Nedostatak kvarcnih izvora je da ne mogu titrati velikim amplitudama, jer se kristal može razoriti. Uz to, frekvencija ultrazvuka ovisi o dimenzijama kristala. Između mnogih primjena ultrazvuka proizvedenog magnetostrikcijom, može se istaknuti sonar, s pomoću kojeg se mogu otkrivati predmeti pod morem, mjeriti dubina, otkrivati jata riba i dr. S pomoću magnetostrikcije može se mjeriti debljina stijena ili tražiti razna oštećenja u zidovima.[15]



Slika 17. Generiranje ultrazvuka magnetostrikcijom [16]

4.3. Kavitacija

Kavitacija (engl. cavity – znači šupljina) je pojava isparavanja vode i stvaranja mjehura vodene pare. Nastaje u trenutku kada tlak vode postaje jednak ili manji od tlaka zasićenja vodene pare. Ta pojava se može podijeliti na nekoliko faza: faza nastajanja, rasta (ekspanzije) i rapidnog kolapsa mjehurića u kapljevitom fluidu.

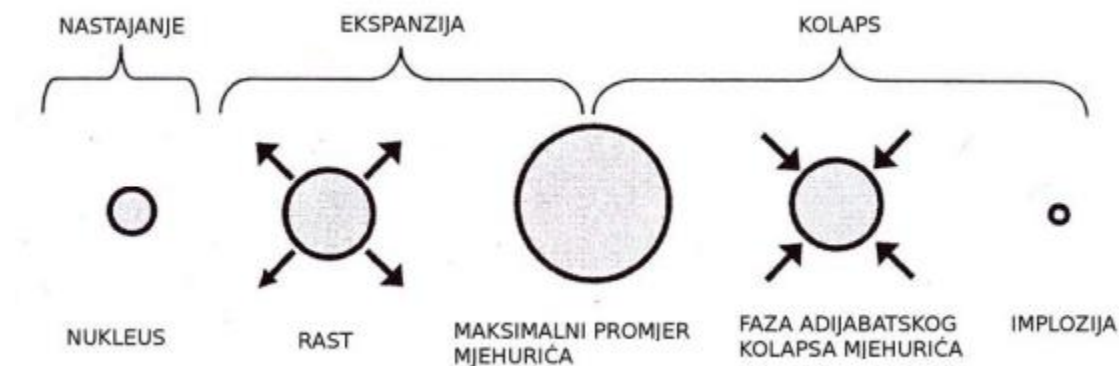


Na faznom dijagramu je vidljivo kako zapravo nastaje kavitacija. U realnim tekućinama kavitacija najčešće nastaje izotermno, smanjujući tlak vode ispod tlaka zasićenja pri približno konstantnoj temperaturi. Slično kao i kod vrenja, kod kojega je promijenjiva varijabla temperatura, a tlak je konstantni. Iako, u nekim slučajevima se dogodi da promijena faze uzrokuje malu promijenu u temperaturi T'_f koja je niža od okolne temperature tekućine. Ta razlika u temperaturi ($T - T'$) naziva se temperaturno kašnjenje i veća je što je temperatura tekućine bliža kritičnoj točki C.

Oblik kavitacije može se podijeliti u tri grupe[19]:

- Prolazni izolirani mjehurići. Oni se pojavljuju u regijama smanjenog tlaka kao rezultat vrlo brzog rasta malih čestica zraka prisutnih u tekućini. Oni su nošeni glavnim tokom i zatim nestaju kada uđu u područje dovoljno povišenog tlaka.
- Mjehurići koji su nastali uz vodeći rub cijevi ili na djelu lopatice sniženog tlaka
- Kavitacijski vrtlozi. Kavitacija može nastati u niskotlačnom djelu jezgre vrtloga kod turbulentnog strujanja ili u obliku 3-D krila lopatica propelera

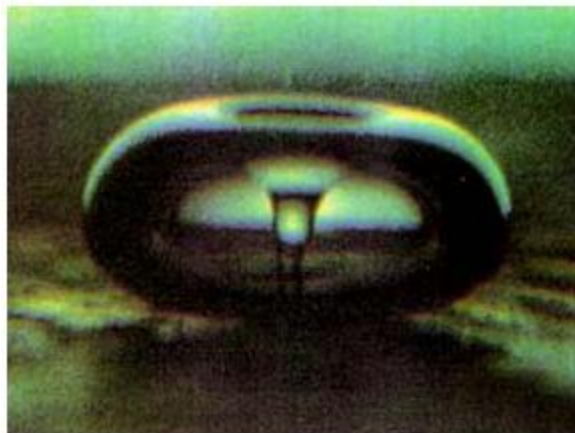
Kavitacija se također može izazvati i u mirujućem ili gotovo mirujućem fluidu, ako se primjeni oscilirajuće polje tlaka na površinu vode unutar nekog spremnika. Ovaj tip kavitacije se naziva akustična kavitacija. U odgovarajućim uvjetima prvo se dešava nastajanje mjehurića, zatim slijedi rast, te se na kraju ovog procesa odvija kolaps odnosno implozija mjehurića kako je prikazano na slici 18. Sam tijek procesa kavitacije odvija se u relativno kratkom vremenskom intervalu od 10^{-8} do 10^{-6} sekundi. Implozija mjehurića može izazvati mikroskopsku pojavu kratkotrajnih visokih temperatura i tlakova koji dosežu brzinu od preko 100 m/s. [17]



Slika 18. Prikaz procesa kavitacije [17]

Postoje četiri vrste kavitacije, s obzirom na način pobuđivanja [17]:

- hidrodinamička kavitacija koja nastaje kao posljedica velikog pada tlaka u gibajućoj kapljevini koja je uzrokovana lokalnim velikim porastom kinetičke energije fluida,
- akustična kavitacija koja nastaje kao posljedica varijacije tlaka u kapljevini kada kroz nju prolaze ultrazvučni valovi,
- optička kavitacija koja nastaje kao posljedica djelovanja svjetlosti visokog intenziteta ili lasera na kapljevine i
- kavitacija koju uzrokuju čestice (čestična kavitacija) koja nastaje kao posljedica djelovanja različitih elementarnih čestica (na primjer protona) na kapljevine.



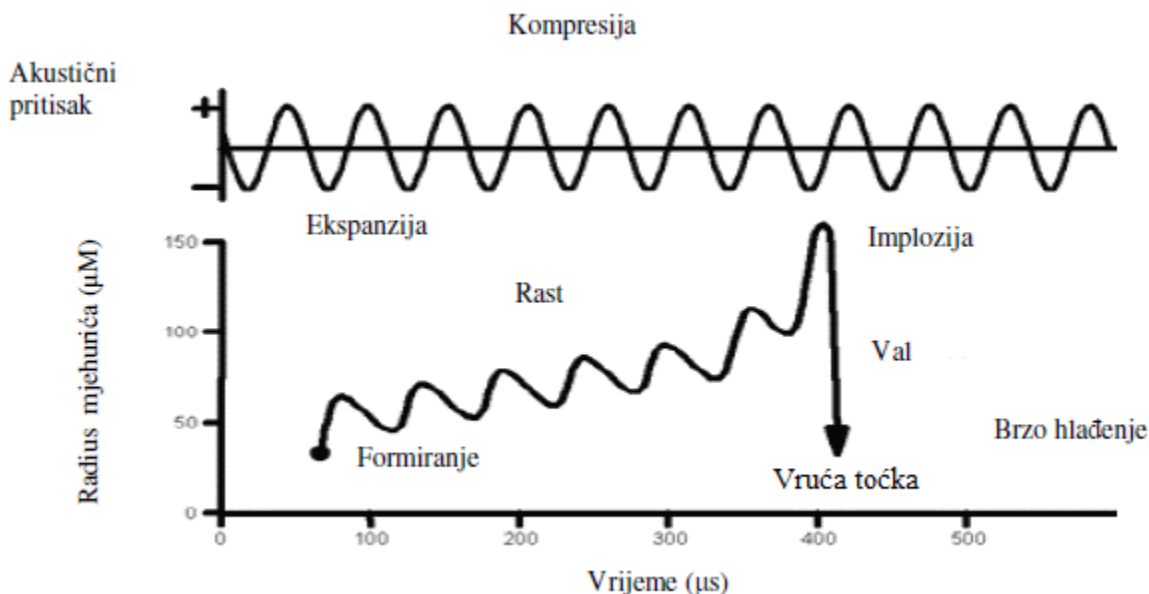
Slika 19. Prikaz kavitacijskog mjehura[18]

4.3.1. Akustična kavitacija

Akustična kavitacija je formiranje mjehurića, naknadni rast i implozivno urušavanje mjehurića pri djelovanju ultrazvuka na kapljevinu. Prilikom širenja zvučnog vala kroz tekući medij nastaju longitudinalni valovi što dovodi do izmjeničnih ciklusa kontrakcije i ekspanzije te ekspanzivnih vrtloga. Kao rezultat oscilacija tlaka u mediju mjehurići osciliraju te uvijek u fazi ekspanzije malo više narastu nego što se smanje tijekom faze kompresije. U određenom trenutku, kao što je prikazano na slici 20, kada mjehurić dosegne određenu kritičnu veličinu ne može više učinkovito apsorbirati energiju, a bez ulazne energije šupljina se ne može samo održavati i mjehurić se urušava sam u sebe. Kritična veličina mjehurića ovisi o primijenjenoj frekvenciji i mediju koji se tretira, npr. pri primijenjenoj frekvenciji ultrazvuka od 20 kHz, kritična veličina je okvirno 170 μm . Takve ciklusne fluktuacije tlaka dovode do formiranja velikog broja udubljenja, koje nastaju zbog povećane difuzije plina u mjehuriću tijekom ekspanzijskog ciklusa, uslijed povećanja površine mjehurića. Kada energija ultrazvuka nije dostatna da se zadrži plinska faza u mjehuriću dolazi do brze kondenzacije kada se kondenzirane molekule sudaraju velikom brzinom, pri čemu nastaju udarni valovi. Takvi udarni valovi uzrokuju vrlo visoke temperature (do 5500 K) i tlakove (do 100 MPa), što dovodi do mijenjanja fizikalno-kemijskih svojstava lokalnih molekula. Za stvaranje kavitacije najvažniji faktor je frekvencija ultrazvuka. Pri frekvencijama višim od 1 MHz male su šanse za kavitaciju, a iznad 2.5 MHz nema kavitacija. Osim o frekvenciji i intenzitetu ultrazvuka, pojava kavitacije ovisi o svojstvima proizvoda poput viskoznosti medija, gustoći, površinskoj napetosti medija, prisutnosti, prisutnosti otopljenih plinova itd. Također temperatura je obrnuto proporcionalna početku kavitacije.

Intenzitet kavitacije koja se događa u tekućem mediju ovisi uvelike o koligativnim svojstvima tog medija, koji uključuju tlak pare, površinsku napetost, viskozitet i gustoću, kao i o bilo kojem drugom svojstvu koje se odnosi na broj atoma, iona, molekula u mediju. Energija potrebna za formiranje mjehurića kavitacije u tekućem mediju je razmjerna površinskoj napetosti

i tlaku pare. Stoga, što je veća površinska napetost tekućine, bit će veća energija potrebna za stvaranje kavitacijskih mjehurića, a posljedično će biti veća energija udarnog vala koji se proizvodi kada mjehurić implodira. U čistoj vodi na primjer, čija je površinska napetost oko 70 mN/m, kavitacija se jako teško proizvodi pri temperaturi okoliša. To je međutim moguće proizvesti lakše kada je u vodu dodan površinski aktivni agens, čime se smanjuje površinsku napetost na oko 30 N/m. Na isti način, kada je tlak pare tekućine nizak, kao što je slučaj s hladnom vodom, kavitaciju je teško postići, ali postaje sve lakše kako raste temperatura. Svaka tekućina, zapravo, ima karakterističnu temperaturu pri kojoj kavitacija pokazuje najveću aktivnost, uglavnom prilično ograničen raspon temperatura.[18]



Slika 20. Usporedba ciklusa kompresije i ekspanzije sa formiranjem, rastom i implozijom kavitacijskog mjehurića [18]

Uslijed tih ekstremnih uvjeta: formiranje, rast i kolaps mjehurića, u polju djelovanja ultrazvuka, molekule tvari unutar mjehurića se razlažu te stvaraju visoko reaktivne radikale. Radikali su zapravo čestice (atomi ili molekule) koje sadrže jedan elektron. Slobodni radikali su vrlo bogati energijom, lako reagiraju s drugim molekulama ili slobodnim radikalima i označuju se sa točkom. Ako se ultrazvuk primjenjuje u vodenom mediju, nastaju $\cdot\text{H}$ i $\cdot\text{OH}$ radikali. [18]



4.3.2. Ravnotežni uvijet

Unutrašnjost mjehurića se može sastojati od samo pare ili pare i plina. Jednadžba koja povezuje okolni tlak tekućine i tlakove unutar mjehurića je [19]:

$$p_{\infty} = p_g + p_v - \frac{2S}{R} \quad (11)$$

gdje je p_g parcijalni tlak plina unutar mjehura, p_v tlak pare, S površinska napetost, a R radius.

Formula početnog stanja glasi[19]:

$$p_{\infty 0} = p_{g0} + p_v - \frac{2S}{R_0} \quad (12)$$

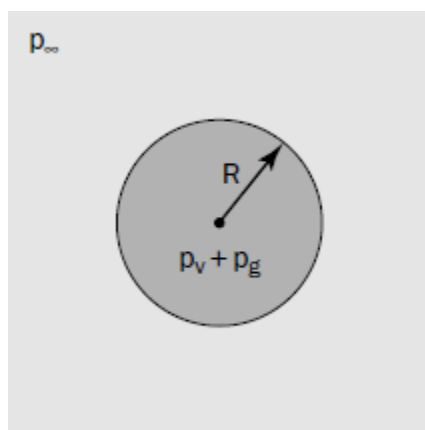
Pošto je tlak plina obrnuto proporcionalan sa volumenom u izotermičkom procesu, jednadžba (11) se može preoblikovati u[19]:

$$p_{\infty 0} = p_{g0} \left[\frac{R_0}{R} \right]^3 + p_v - \frac{2S}{R_0} \quad (13)$$

Slijede jednadžbe za kritični tlak i kritični radius[19]:

$$R_c = R_0 \sqrt{\frac{3p_{g0}}{2S/R_0}} \quad (14)$$

$$p_c = p_v - \frac{4S}{3R_c} \quad (15)$$



Slika 21. Mikromjehur u tekućini[19]

4.3.3. Dinamika sfernog mjehura

4.3.3.1. Rubni i početni uvjeti

Prijenos mase kroz stijenku je zanemariv. Brzina tekućine $u(R, t)$ na granici je jednaka graničnoj brzini $\dot{R} = dR/dt$. U slučaju viskoznog fluida kinematičke viskoznosti μ , normalno naprezanje na granici je [19]:

$$t_{rr}(R, t) = -p(R, t) + 2\mu \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} \quad (16)$$

Ravnoteža normalne sile je opisana jednadžbom [19]:

$$-t_{rr}(R, t) = p_v + p_g(t) - \frac{2S}{R} \quad (17)$$

gdje je p_g označen parcijalni tlak plina unutar mjehura. Uz pretpostavku adiabatske transformacije plina, trenutni tlak plina je povezan sa početnim tlakom p_{g0} sa sljedećim izrazom [19]:

$$p_g(t) = p_{g0} \left[\frac{R_0}{R(t)} \right]^{3\gamma} \quad (18)$$

gdje je γ omjer toplinskih kapaciteta c_{pg} i c_{vg} .

Slijedi da je tlak na stijenci šupljine dan izrazom [19]:

$$p(R, t) = p_v + p_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2S}{R} + 2\mu \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} \quad (19)$$

Podalje od mjehura tekućina miruje $u(\infty, t) \rightarrow 0$, a tlak $p(\infty, t)$ označen kao $p_\infty(t)$ je zadan.

Za početne uvjete (označene sa indeksom 0), pretpostavlja se da je mjehur u ravnoteži, tj. da je $\dot{R}(0) = 0$, tako da je jednadžba (12) zadovoljena.

4.3.3.2. Rayleigh-Plesset equation

Rayleigh-Plesset jednadžba nam omogućuje da odredimo promjenu radiusa R u vremenu i posljedično tome, polje tlaka u tekućini dok nam je poznat tlak $p_\infty(t)$.

Zakon očuvanja mase za nestlačivi fluid nam daje [19]:

$$u(r, t) = \dot{R} \frac{R^2}{r^2} \quad (20)$$

Za viskozni i neviskozni fluid, momentna jednačba je jednaka [19]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (21)$$

Kada se jednačba (20) ubaci u (21) dobije se [19] :

$$\ddot{R} \frac{R^2}{r^2} + 2\dot{R}^2 \left[\frac{R}{r^2} - \frac{R^4}{r^5} \right] = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (22)$$

Uzimajući u obzir pretpostavke za r i za beskonačnost, dobivamo [19] :

$$\frac{p(r, t) - p_{\infty}(t)}{\rho} = \ddot{R} \frac{R^2}{r} + 2\dot{R}^2 \left[\frac{R}{r} - \frac{R^4}{4r^4} \right] \quad (23)$$

Ova jednačba je ekvivalentna Bernoulliovoj jednačbi za promjenjivi nestabilni protok neviskoznog fluida. Na udaljenosti $r = R$, jednačba glasi [19] :

$$\frac{p(R, t) - p_{\infty}(t)}{\rho} = R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \quad (24)$$

Na kraju, iz izraza (19), za tlak na stijenci, primjećujemo da je [19] :

$$\left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R} = -\frac{2\dot{R}}{R} \quad (25)$$

i jednačba (23) postaje [19] :

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right] = p_v - p_{\infty}(t) + p_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2S}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \quad (26)$$

Za neviskozne fluide posljednji član na desnoj strani jednačbe otpada. Gornja jednačba (26) zove se Rayleigh-Plesset-ova jednačba.

4.3.4. Urušavanje (kolaps) mjehura

Prije početka kolapsa, pretpostavlja se da je mjehur u ravnoteži između vanjskog tlaka $p_{\infty 0}$, koji je jednak unutarnjem tlaku p_v , prema jednačbi (12), ako se zanemari parcijalni tlak plina u mjehuru i površinska napetost. Na početku $t=0$, konstantni tlak p_{∞} , viši od p_v je primijenjen na tekućinu, što rezultira kolapsom mjehura u vremenu τ koje se naziva Rayleigh-ovo vrijeme.

Ovaj jednostavni model omogućuje nam opisati glavne značajke kolapsa mjehura za gotovo neviskozni fluid kao što je voda. Treba napomenuti da bi se proces kolapsa, ako se površinska napetost ne zanemari, bila lagano ubrzana [19].

4.3.4.1. Brzina urušavanja mjehura

Uz prijašnje pretpostavke, i ako primijetimo da vrijedi jednakost [19]:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{2\dot{R}R^2} \frac{d}{dt} [\dot{R}^2 R^3] \quad (27)$$

Rayleigh-Plesset-ovu jednadžbu možemo prikazati u obliku [19]:

$$\rho \dot{R}^2 R^3 = -\frac{2}{3}(p_\infty - p_v)(R^3 - R_0^3) \quad (28)$$

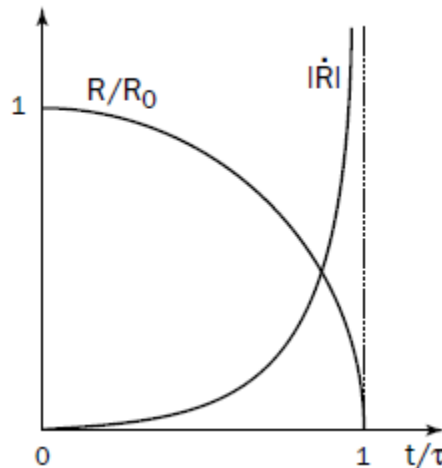
S obzirom da je \dot{R} negativan tijekom urušavanja (kolapsa) mjehura, slijedi da je [19]:

$$\frac{dR}{dt} = -\sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_\infty - p_v}{\rho} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right]} \quad (29)$$

Radius teži u nulu i radialno kretanje prema unutra ubrzava bez granica. Numerička integracija ove jednadžbe omogućava prikaz radijusa $R(t)$ kao funkcije o vremenu. Karakteristično vrijeme urušavanja (kolapsa) ili Rayleigh-ovo vrijeme je [19]:

$$\tau = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{\rho}{p_\infty - p_v}} \int_0^{R_0} \frac{dR}{\sqrt{\frac{R_0^3}{R^3} - 1}} \cong 0.915 R_0 \sqrt{\frac{\rho}{p_\infty - p_v}} \quad (30)$$

Vrijednost τ se podudara sa eksperimentalnim vrijednostima za širok raspon početnih radijusa mjehura, od oko 1 μm pa sve do 1 m. Na primjer, u slučaju vode, mjehur radijusa 1 cm se urušava u vremenu od oko 1 ms, pod pritiskom vanjskog tlaka od 1 bar.



Slika 22. Promjena radijusa $R(t)$ i brzine $\dot{R}(t)$ tijekom kolapsa [19]

Na slici 22 prikazano je ponašanje radijusa $R(t)$ i brzine $\dot{R}(t)$. \dot{R} teži u beskonačnost na kraju urušavanja. Kada R teži u nulu, brzina \dot{R} se mijenja po pravilu [19]:

$$|\dot{R}| \cong \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_\infty - p_v}{\rho} \left[\frac{R_0}{R} \right]^{\frac{3}{2}}} \cong 0.747 \frac{R_0}{\tau} \left[\frac{R_0}{R} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (31)$$

Na kraju urušavanja, radijus se mijenja po pravilu [19]:

$$\frac{R}{R_0} \cong 1.87 \left[\frac{\tau - t}{\tau} \right]^{\frac{2}{5}} \quad (32)$$

Sa već zadanim numeričkim vrijednostima, izračunate su vrijednosti brzine od $|\dot{R}| \approx 720$ m/s za radijus $R/R_0=1/20$. Takve visoke vrijednosti brzina, upola manje od brzine zvuka u vodi (1440m/s), dovode do zaključka da se tlačivost fluida mora uzeti u obzir kod završne faze urušavanja[19].

4.3.4.2. Polje tlaka

Polje tlaka $p(r,t)$ može biti definirano jednačbom (23), gdje je \dot{R} poznat iz jednačbe (29), a \ddot{R} se može izvesti deriivacijom, što daje:

$$\ddot{R} = -\frac{p_\infty - p_v}{\rho} \frac{R_0^3}{R^4} \quad (33)$$

Definiran je bezdimenzionalni parametar Π [19]:

$$\Pi(r, t) = \frac{p(r, t) - p_\infty}{p_\infty - p_v} = \frac{R}{3r} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 4 \right] - \frac{R^4}{3r^4} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right] \quad (34)$$

Postižu se vrlo visoke vrijednosti tlaka. Ponašanje bezdimenzionalnog tlaka Π u nekoliko slučajeva prikazano je na slici 23. Postiže maksimum unutar tekućine, čim se vrijednost radijusa spusti ispod $\left(\frac{1}{\sqrt[3]{4}}\right) R_0 \cong 0.63R_0$. Maksimalan tlak se računa prama:

$$\Pi_{max} = \frac{p_{max} - p_\infty}{p_\infty - p_v} = \frac{\left[\frac{R_0^3}{4R^3} - 1 \right]^{4/3}}{\left[\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right]^{1/3}} \quad (35)$$

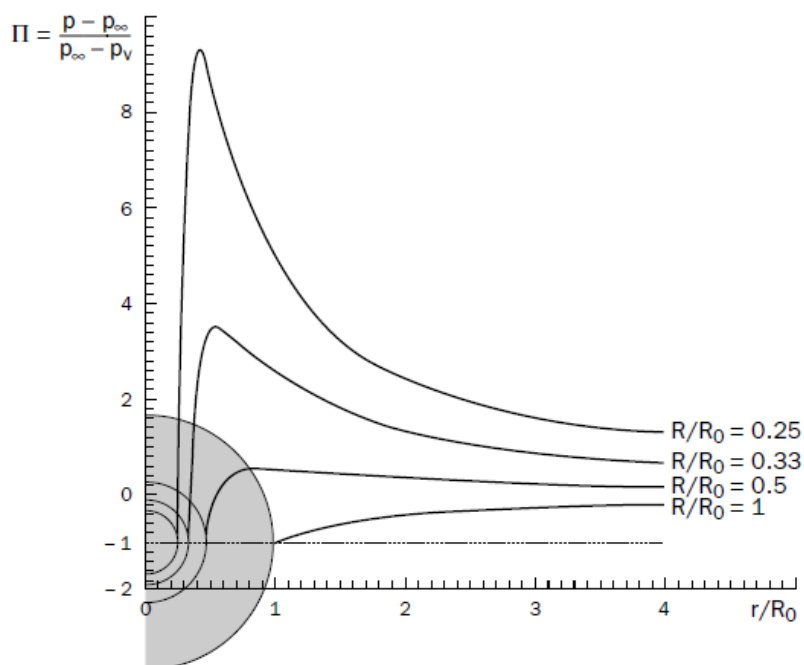
i zahvaća područje na udaljenosti r_{max} od središta mjehura[19]:

$$\frac{r_{max}}{R} = \left[\frac{\frac{R_0^3}{4R^3} - 1}{\frac{R_0^3}{4R^3} - 1} \right]^{1/3} \quad (36)$$

Kada vrijednost R/R_0 postane mala, gornji izrazi daju približne jednakosti [19]:

$$\Pi_{max} \approx \frac{1}{4^{4/3}} \left[\frac{R_0}{R} \right]^3 \cong 0.157 \left[\frac{R_0}{R} \right]^3 \quad (37)$$

$$\frac{r_{max}}{R} \approx \sqrt[3]{4} \cong 1.59 \quad (38)$$



Slika 23. Stvaranje polja tlaka za vrijeme urušavanja mjehura [19]

4.4. Ultrazvučno čišćenje

Ultrazvučni čistač je uređaj koji koristi ultrazvuk (najčešće od 20-400 kHz) i odgovarajuću tekućinu (ponekad i običnu vodu) za čišćenje predmeta. Ultrazvuk može biti primijenjen u kombinaciji sa vodom, a ponekad i sa odgovarajućom otopinom koja poboljšava čišćenje. Čišćenje obično traje od 3 do 6 minuta.

Ultrazvučni čistači (ultrazvučne kadice) koriste se za čišćenje različitih vrsta predmeta uključujući nakit, objekte i različite optičke djelove, satove, zubne i kirurške instrumente, alate, kovanice, nalifpera, palice za golf, vatreno oružje, muzičke instrumente, industrijske elemente i elektroničku opremu. Korišteni su u mnogim zlatarnama, u proizvodnji satova i elektroničkim servisima. Takvi čistači su se počeli primjenjivati u industriji 50-ih godina prošlog stoljeća, a u 70-ima su primjenu našli i u domaćinstvima[21].

4.4.1. Karakteristike procesa

Ultrazvučno čišćenje koristi kavitacione mjehuriće, proizvedene pomoću visoko frekventnih tlačnih (zvučnih) valova usmjerenih u tekućinu. Proces mućkanja stvara velike sile koje skidaju prljavštinu i nečistoće sa materijala kao što su metali, plastike, stakla, gume i keramika. Te sile također prodiru i u rupe, pukotine i u udubljenja. Namjera je temeljito uklanjanje svih tragova onečišćenja čvrsto pripijenih ili nastalih na čvrstim površinama. U nečistoće se ubrajaju prašina, zemlja, ulja, pigmenti, hrđa, maziva, alge, gljivice, bakterije, vodeni kamenac, otisci prstiju, vosak, čađa, plijesan, biološki tragovi poput krvi itd. Ultrazvučno čišćenje se može primijeniti na različite oblike, veličine i materijale i nije nužno da se onečišćeni dio rastavlja zbog čišćenja. Dio koji se podvrgne takvom čišćenju ne smije biti sasvim na dnu, jer se onda taj dio površine, koji nije u dodiru sa vodom ne očisti [21].

4.4.2. Princip rada

U ultrazvučnoj kadici, predmet koji se čisti je umetnut u spremnik koji sadrži vodu ili odgovarajuću otopinu (vodu ili organsku otopinu, ovisno o predmetu). U vodenim kadama, dodaje se deterđent koji razbija površinske napetosti vodene baze. Ultrazvučni davač, sonda, koja je ugrađena u komoru ili je spuštена u tekućinu, proizvodi ultrazvučne valove u fluidu promjenom veličine električnog signala koji oscilira na ultrazvučnoj frekvenciji. To stvara tlačne valove u tekućini spremnika, koji dovode do stvaranja više milijuna mikroskopskih „praznina“ ili „parcijalne vakuumske mjehure“ (kavitaciju). Ti mjehuri se, kako je već objašnjeno ranije, urušavaju (implodiraju) uz veliku energiju; vrijednosti temperatura i tlakova dostižu 5000 K i 1300 bara. Međutim, ti mjehuri su toliko mali da uzrokuju čišćenje i uklanjanje površinskih prljavština i

naslaga. Što je viša frekvencija, to je manji razmak izmeu kavitacijskih točaka, što čišćenje čini temeljitijim.

Otopina za čišćenje sadrži sastojke namijenjene povećanju efektivnosti čišćenja. Npr. smanjivanje površinske napetosti povećava razine kavitacije. Točan sastav otopine ovisi o elementu koji se čisti. Otopine su najčešće zagrijavane na oko 50-65 °C, međutim, u medicinskim primjenama čišćenje bi trebalo biti na temperaturi do 38 °C [21].



Slika 24. Ultrazvučne sonde sa piezoelektričnom keramikom [22]

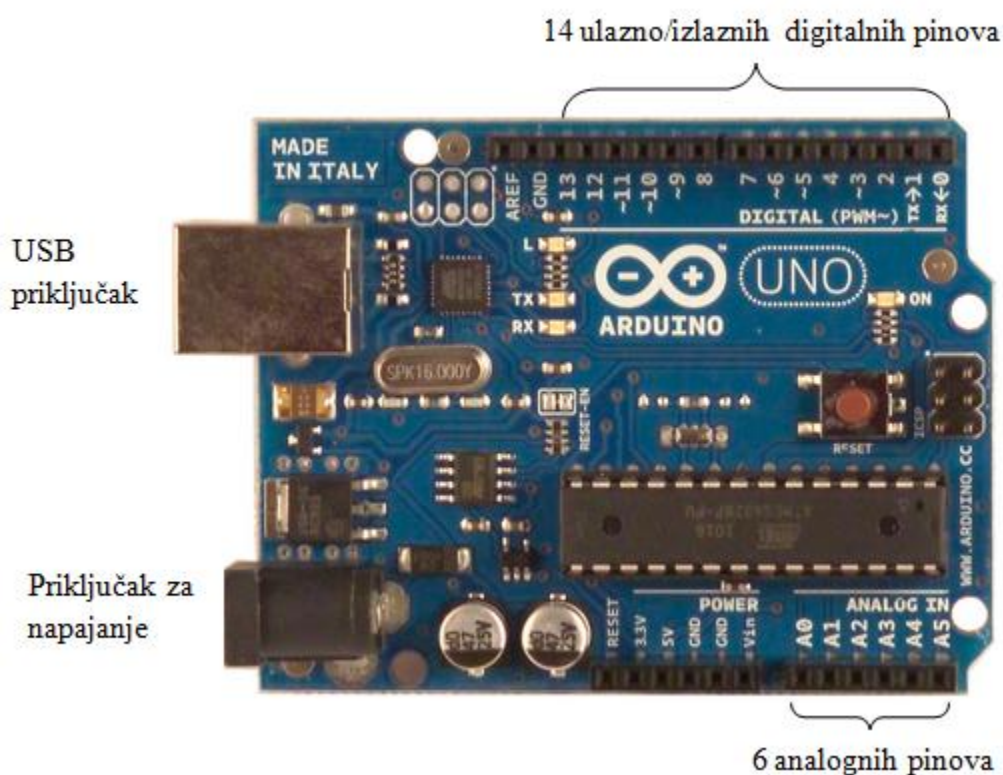


Slika 25. Ultrazvučna kadica (zapremnina 600 ml) [22]

5. ARDUINO MIKROKONTROLER

Arduino je programabilna platforma otvorenog koda bazirana na fleksibilnim, „easy-to-use“ hardveru i softveru. Namijenjen je umjetnicima, dizajnerima, hobbistima i svakome tko je zainteresiran za stvaranje interaktivnih objekata ili okruženja.

Mikrokontroler na pločici se programira pomoću Arduino programskog jezika koji se temelji C-u i koristi Wiring framework i pomoću razvojne okoline bazirane na Processingu. Wiring je razvojna cjelina ili “kostur“ otvorenog koda za programiranje mikrokontrolera. Processing je programski jezik, razvojno okruženje i online zajednica. Arduino projekti se mogu izvršavati samostalno ili mogu komunicirati sa softverom pokrenutim na računalu (Flash, Processing).



Slika 26.

Arduino Uno pločica [24]

5.1. Hardver

Arduino dobiva informacije o okruženju pomoću različitih senzora i također je u mogućnosti utjecati na svoju okolinu upravljanjem svjetlosti, motorima i ostalim aktuatorima. Arduino pločicu čine 8-bitni Atmel AVR ili 32-bitni Atmel ARM mikrokontroler sa pripadajućim komponentama koje omogućuju programiranje i povezivanje sa drugom elektronikom. Bitan aspekt Arduino pločice je standardiziran raspored konektora koji omogućava lako povezivanje sa

dodatnim modulima, poznatijim kao štitovi. Neki štitovi komuniciraju sa Arduinoom direktno preko pinova, a mnogi su zasebno adresabilni preko serijske veze, što omogućuje paralelno korištenje više štitova. Arduino ploče uglavnom koriste megaAVR seriju čipova, konkretno Atmega8, Atmega168, Atmega328, Atmega1280 i Atmega2560. Većina ploča posjeduje 5V linearni naponski regulator i 16Mhz kristalni oscilator (ili keramički rezonator u nekim verzijama). Arduino mikrokontroleri se isporučuju sa programiranim bootloader-om koji pojednostavljuje postupak prebacivanja prevedenog koda u fleš memoriju na čipu. Drugi mikrokontroleri obično zahtijevaju zaseban programator.

Kod korištenja Arduino softvera, sve ploče se programiraju preko RS-232 serijske veze, ali način na koji se to izvodi, razlikuje se na različitim verzijama hardvera. Serijske Arduino ploče sadrže jednostavan krug za pretvaranje RS-232-razine i TTL-razine signala. Današnje Arduino ploče se programiraju preko USB-a, provedenog preko USB-serijskog čipa, kao što je FTDI FT232 čip. Neke Arduino ploče, kao što je Arduino Mini i neslužbeni Boarduino, koriste odvojivi USB-serijski adapter ili kabel, Bluetooth ili neke druge metode.

Arduino pločica omogućuje korisniku za korištenje većinu I/O pinova mikrokontrolera. Dječimila, Duemilanove i trenutna Uno verzija Arduino pločice osigurava 14 digitalnih I/O pinova, od kojih 6 mogu proizvesti pulsno-modulirani signal PWM, a 6 su analogni ulazi. Ti pinovi nalaze se na vrhu pločice. Arduino Nano i Boarduino pločice sadrže pinove na stražnjoj strani pločice i za korištenje trebaju eksperimentalnu pločicu kako bi se uključili [23].

5.2. Arduino softver

U ovom poglavlju je opisano nekoliko osnovnih segmenata programiranja Arduino mikrokontrolera. Programiranje Arduina je vrlo slično programiranju u C-u.

5.2.1. Osnovne naredbe `setup()` i `loop()`

Svaki Arduino program mora imati dvije glavne naredbe kako bi se ispravno izvršavao: `setup()` i `loop()`. Osnovni Arduino program izgleda ovako [25] :

```
void setup()
{
  // Postavljanje Ulaza/Izlaza
}
void loop()
{
  // Izvršavaj nešto
}
```

`setup ()` se koristi za postavljanje Ul./Izl. portova kao što su LED diode, senzori, motori, serijski portovi. Pažljivo postavljanje je važno jer ako namjeravamo koristiti određene pinove, moramo „reći“ Arduinou da će biti korišteni.

loop() sadrži dio koda koji kontrolira ul./izl. portove. Naprimjer, kada želimo namjestiti određenu brzinu vrtnje motora i sl.

5.2.2. Inicijalizacija varijabli

Varijable su najosnovniji programski gradbeni blokovi; koriste se za prijenos podataka kroz program. U tablici su prikazani nekoliko različitih tipova varijabli u Arduino jeziku:

Tablica 2. Različite vrste varijabli [25]

Vrsta varijabli	Vrijednost
char	'a'
byte	1011
Int	-1
unsigned int	5
long	512
unsigned long	3,000,000
float	2.513

Nakon što smo upoznati sa vrstama varijabli, moramo znati kako ćemo ih deklarirati. Moramo znati kojoj skupini te varijable pripadaju. Ovdje ćemo navesti dvije skupine za varijable: lokalne varijable i globalne varijable. Lokalne varijable djeluju samo u zadanom području. Na primjer, *for* petlja zadržava svoje varijable unutar svojih zagrada, stoga, te su varijable lokalne za *for* petlju. Globalne varijable se mogu pozvati sa bilo kojeg mjesta u programu. Kako bi definirali globalne varijable, moramo ih inicijalizirati na početku programa. Sljedeći program prikazuje kako se inicijaliziraju lokalne i globalne varijable [25]:

```
int x; // Postavljanje varijable x kao globalnu varijablu
void setup()
{
}
void loop()
{
    x = 1 + 2; // Pridruživanje vrijednosti 3 varijabli x
    for(int i; i <= 100; i++)
    {
        // i je postavljena kao lokalna varijabla i može biti pozvana samo unutar for petlje.
    }
}
```

Nizovi (Arrays) omogućavaju unos nekolicine vrijednosti istog tipa, na primjer, ako želimo unijeti više digitalnih pinova bez da ih pojedinačno postavljamo:

```
int pins[] = {13,9,8};
```

5.2.3. Pisanje uvjetnih naredbi

Uvjetne naredbe mogu se koristiti za kontrolu tjeka programa. Npr., želimo pokrenuti motor samo ako je tipka pritisnuta; to se postiže uvjetnom naredbom. Ukratko su opisane sljedeće uvjetne naredbe: *if*, *if-elseif*, *if-else* i *switch* naredbe.

if naredba je vrlo važna uvjetna naredba; moguće ju je koristiti u bilo kakvoj logičkoj operaciji, npr. kod limitiranja. Slijedi primjer *if-elseif* naredbe [25]:

```
int i;
if (i < 10)
{
    i++;
}
else if ( i > 10)
{
    i--;
}
```

Primjer korištenja naredbi *if-else* kod očitavanja vrijednosti sa potencijometra:

```
potValue = analogRead(potPin);
if (potValue <= 500)
{
    digitalWrite(motorpin, 1);
}
else
{
    digitalWrite(motorpin, 0);
}
```

switch naredbe se koriste kada postoji više uvjeta, pomoću njih je programski kod ljepše napisan:

```
switch (potValue) {
case 500;
    digitalWrite(motorPin, 1);
case 501;
    digitalWrite(ledPin, 1);
    break;
default:
    digitalWrite(motorPin, 0);
    digitalWrite(ledPin, 0);
}
```

Ako je `potValue` jednak 500, onda će se motor uključiti, ako je `potValue` jednak 501, LED dioda će se uključiti. Postavljeno stanje je istinito kada vrijednost `potValue` nije ni 500 ni 501. U tom slučaju i motor i LED će biti ugašeni.

5.2.4. Rad sa petljama

Petlje nam puno koriste kod odbacivanja viška koda. Petlje koje ćemo koristiti su: *for*, *while* i *do-while*. Te petlje nam omogućuju pokretanje programa dok je uvjet istinit (ili neistinit u određenim okolnostima). Primjena *for* petlji može poslužiti za npr. ponavljanje određenog bloka naredbi određeni broj puta [25]:

```
for (int i = 0; i <=10; i++)
{
    // Ovdje ubaciti naredbe
}
```

- Naredba *pinMode* se koristi za postavljanje ul./izl. pinova sa Arduina. *while* petlja će se izvršavati dok je uvjet istinit. Ako je prvi uvjet neistinit, neće se pokrenuti uopće. Npr. *while* petlja se koristi kada želimo da se program izvršava sve dok ne dobijemo određeni signal sa senzora. Slijedi primjer:

```
int potPin = A1;
int motorPin = 9;
int potVal;
void setup()
{
    pinMode(motorPin, OUTPUT);
    pinMode(potPin, INPUT);
}
void loop()
{
    potVal = analogRead(potPin);
    while(potVal <= 100) // Izvršava se dok potVal nije veći od 100
    {
        digitalWrite(motorPin,1);
    }
}
```

- Na početku koda izvršava se inicijalizacija pinova potencijometra i motora; nakon toga se postavlja *potVal*, varijabla koja sadrži vrijednost potencijometra. Zatim je postavljen *motorPin* na izlaz i *potPin* na ulaz. Konačno, iskoristili smo *while* petlju sa uvjetom *potVal <=100* i sve dok će taj uvjet biti istinit, motor će biti upaljen.

- Petlja *do-while* je ista kao i *while* petlja osim što se ispitivanje uvjeta izvršava na kraju petlje. Stoga, ova petlja će se izvršiti minimalno jedan put. Slijedi primjer:

```
do
{
    i++; // Povećanje i-a
}while(i <= 100);
```

5.2.5. Digitalno komuniciranje

Važno je znati kako funkcionira veza (komunikacija) između različitih ul./izl. digitalnih pinova. Konkretno, koristimo *digitalWrite(pin,HIGH/LOW)* i *digitalRead(pin)* naredbe za komunikaciju sa digitalnim pinovima. Slijedi primjer [25] :

```
int button = 12;
int led =13;
int buttonState;
void setup()
{
    pinMode(button,INPUT);
    pinMode(led,OUTPUT);
}
void loop()
{
    buttonState = digitalRead(button); // Pridruživanje button-a buttonstate-u
    if(buttonState == 1)
    {
        digitalWrite(led,HIGH); // Pridruživanje 1 pinu 13
    }
    Else
    {
        digitalWrite(led,LOW); // Pridruživanje 0 pinu 13
    }
}
```

Ovaj program koristi naredbe *digitalWrite()* i *digitalRead()* kako bi saznao vrijednost tipke na pinu 12 i obzorom na to postavio novu vrijednost (HIGH ili LOW).

5.2.6. Komunikacija sa analognim komponentama

Postoji mogućnost i analogne komunikacije sa senzorima i motorima, što znači da se može spojiti potencijometar koji upravlja brzinom motora kroz (PWM) pin na Arduino. Naredba za

analognu komunikaciju je *analogRead(value)* i *analogWrite(pin,value)*. Jedino što još valja zapamtiti je da potencijometar može davati vrijednosti od 0-1024, tako da treba skalirati *analogWrite* od 0-255, npr.[25] :

```
analogWrite(LED, ledValue/4); // 1024/4=255
```

5.2.7. Serijska komunikacija

Serijska komunikacija služi za komunikaciju sa računalom, LCD-om i mnogim drugim uređajima. Ovo su neke od naredbi koje se koriste kod serijske komunikacije: *Serial.begin(baud)*, *Serial.println(„ono što se želi napisati na određeni pin“)*, *Serial.read()*, *Serial.write(Binary data)*, *Serial.available()*, *Serial.end()*. Te naredbe omogućuju nam da čitamo ili ispisujemo preko serijske veze. Slijedi kratak opis pojedne naredbe [25]:

- *Serial.begin(brzina prijenosa podataka)* : Ova naredba se treba nalaziti u *setup()* strukturi i treba sadržavati brzinu prijenosa podataka za uređaj sa kojim komunicira preko serijske veze, npr.:

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // brzina od 9600 bit/sec za kom. sa računalom
}
```

- *Serial.println()* : ova naredba se koristi kako bi ispisali nešto na serijskom portu:

```
void loop()
{
  Serial.println(„Hello world“); // Ispisuje Hello world na serijskom portu
}
```

- *Serial.read()*: Učitava vrijednost sa serijskog porta. Npr., može se iskoristiti za učitavanje nečega sa računala što kasnije želimo prikazati na LCD-u na Arduino.

```
void loop()
{
  char var = Serial.read(); // Čita nadolazeći bit sa serijskog porta
}
```

- *Serial.write()*: Upisuje binarni podatak na serijski port, npr.:

```
void loop()
{
  while(Serial.available() > 0)
```

```

    {
        char var = Serial.read(); // Čita nadolazeći bit
        Serial.write(var);      // Upisuje binarni podatak na serijski port
    }
}

```

Ako želimo raditi sa *int* ili *string* vrstom podataka, koristimo naredbu *Serial.println()*. Naredba *Serial.write()* se koristi za binarni prijenos podataka.

- *Serial.available()*: Ispituje da li ima nadolazećih bitova na serijskom portu, npr.:

```

void loop()
{
    while(Serial.available() > 0) //Ispituje da li postoji barem jedan bit na serijskom portu
    {
        // Ovdje se upisuje željeni kod
    }
}

```

- *Serial.end()*: Onemogućuje serijsku vezu. Slijedi osnovni primjer serijske veze:

```

const int ledPin = 13; // Pin na kojem se nalazi LED dioda.
int incomingByte; // Varijabla u koju se upisuje dolazna vrijednost.
void setup() {
    Serial.begin(9600); // Inicijalizacija serijske veze.
    pinMode(ledPin, OUTPUT); //Inicijalizacija LED pina kao izlaznog.
}
void loop() {
    while (Serial.available() > 0) { // Ispituje da li postoji nadolazeći bit.
        incomingByte = Serial.read(); // Čita najstariji bit u serijskom međuspremniku.
        Serial.println(incomingByte, BYTE); //Ispisuje nadolazeći bit na serijski port
        digitalWrite(ledPin, incomingByte); } // Šalje podatak na LED pin.
    }
}

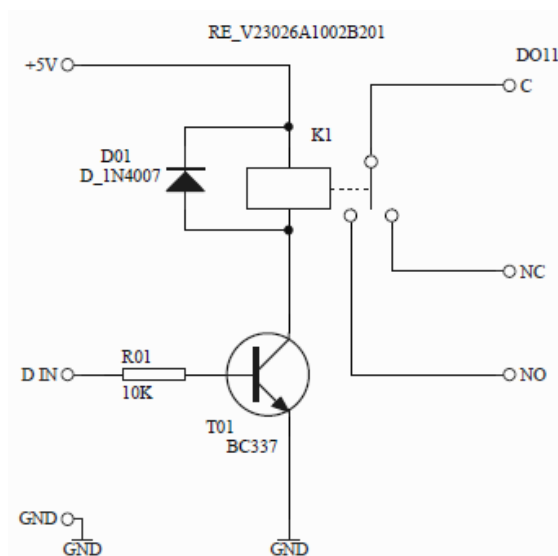
```

Navedeni program opisuje osnovu serijske veze. Program zapravo pali ili gasi LED diodu ovisno o tome da li je podatak poslan sa serijskog porta 1 ili 0.

5.3. Osnovno upravljanje

U ovom poglavlju je pomoću Arduino mikrokontrolera prikazano osnovno upravljanje simulacijskog modela uređaja kao što je kavitacijska kadica. Grafičko sučelje napravljeno je pomoću Processing framework-a.

Kako bi Arduino pločicu i računalo preko kojeg se upravlja zaštitili, potrebno je galvanski odvojiti Arduino pločicu i uređaj kojim se upravlja. To je izvađeno sa pločicom na kojoj se nalazi relej koji preko zavojnice otvara ili zatvara strujni krug na kojeg je priključen uređaj. Električna shema takve pločice prikazana je na slici 27.

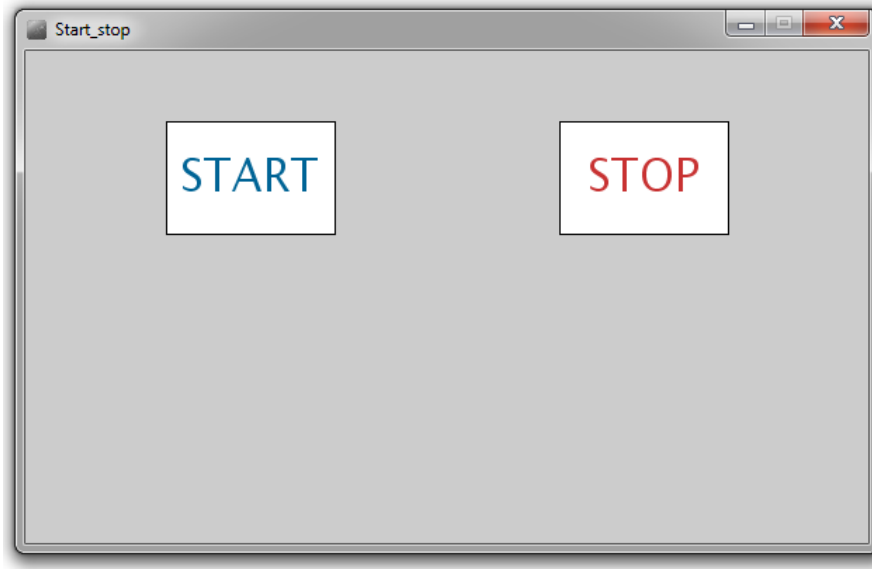


Slika 27. Električna shema pločice

Priključnicu +5V i GND spojimo na predviđene pinove, a D IN na jedan od digitalnih pinova na Arduino, npr. pin 8. Kada mišem pritisnemo tipku START (Processing je objašnjen u sljedećem poglavlju), time šaljemo visoko stanje 'H' na digitalni pin 8 koji je spojen na bazu tranzistora. Tranzistor će zbog toga provesti. Elektromagnetsko polje nastalo oko zavojnice u releju će spojiti kontakte i time zatvoriti drugi strujni krug. Ukoliko pritisnemo mišem tipku STOP, time šaljemo nisko stanje 'L' na pin 8 i zbog toga tranzistor ne vodi, a relej odvaj kontakte i otvara drugi strujni krug. Time su galvanski odvojeni strujni krug Arduinoa od oko 5V i drugi od trošila koje je priključeno na gradsku mrežu od 220 V.

5.3.1. Processing kod

U Processingu je napravljeno osnovno grafičko sučelje pomoću kojeg upravljamo simulacijskim modelom. Stvorene su dvije osnovne naredbe, za pokretanje i zaustavljanje procesa : START i STOP. Grafičko sučelje je prikazano na slici 27.



Slika 28. Processing grafičko sučelje

Slijedi prikaz i opis koda za izradu sučelja u Processingu:

```
import processing.serial.*; // Naredba za slanje i primanje podataka pomoću serijske veze.
Serial port;

void setup() { //Setup () naredba se poziva jednom tijekom programa i služi za
               //postavljanje početnih karakteristika procesa.

    size(600,350); // Dimenzije početnog zaslona.
    rect(100,50, 120, 80); //Određivanje početnih koordinata pravokutnika i njegova dimenzija.
    rect(380,50,120,80);
    textSize(32); //Veličina teksta.
    fill(0, 100, 150); //Određivanje pozadinske boje.
    text("START", 110, 100); // Upisivanje teksta na određenu poziciju.
    fill(200, 50, 50);
    text("STOP", 400, 100);
    println(Serial.list()); //Popis svih serijskih portova.
    port = new Serial(this, Serial.list()[1],9600); //Odabir odgovarajućeg porta i brzine.
}

void draw() // draw() funkcija kontinuirano u petlji izvršava naredbe koje se nalaze
            //unutar nje, sve do prekida programa.
```

```
{  
if (mousePressed == true && mouseX>100 && mouseX<220 && mouseY>50 &&  
mouseY<130){  
    port.write('H'); // Šalje stanje 'H' na izlazni port.  
}  
if(mousePressed == true && mouseX>380 && mouseX<500 && mouseY>50 &&  
mouseY<130){  
    port.write('L'); //Šalje stanje 'L' na izlazni port.  
}  
}
```

5.3.2. Arduino kod

U ovom poglavlju objašnjen je kod koji je potrebno uploadati na Arduino mikrokontroler, kako bi on mogao preko tranzistora upravljati relejom, a preko njega spojenim uređajem.

```
const int tranPin = 8;           //Pin na koji je spojena baza tranzistora.  
int incomingByte;               //Varijabla za čitanje dolazećeg bita.  
  
void setup() {                  // Inicijalizacija serijske veze.  
    Serial.begin(9600);         //Inicijalizacija izlaznog pina.  
    pinMode(tranPin, OUTPUT);  
}  
  
void loop() {  
    if (Serial.available() > 0) { // Provjera podatka serijske veze.  
        incomingByte = Serial.read(); //Čita zadnji bit sa serijskog buffer-a.  
        if (incomingByte == 'H') { // Ako je bit visokog stanja 'H', tranzistor propušta struju.  
            digitalWrite(tranPin, HIGH);  
        }  
        if (incomingByte == 'L') { //Ako je bit niskog stanja 'L', tranzistor ne propušta struju.  
            digitalWrite(tranPin, LOW);  
        }  
    }  
}
```

6. ZAKLJUČAK

Praktični dio ovog rada sadrži osnovno upravljanje simulacijskog modela uređaja za čišćenje kamenca. Sprječavanje taloženja kamenca uvelike može doprinjeti na uštedi energije i još puno drugih stvari koje su navedene ranije u radu. Današnji trend je ubrzan razvoj mikrokontrolera koji upravljaju takvim odstranjivačima. U radu su zbog ograničenosti vremenom, objašnjene osnove programiranja Arduina, kao i osnove programiranja u Processingu. Arduino i Processing potječu od istih urednika, imaju sličnu sintaksu i programsko okruženje. Jednostavno ih je povezati i ostvariti komunikaciju između njih. U radu je navedeno kako se preko Processinga može upravljati izlazima na Arduinu, no moguće je obratno. Moguće je i podatke koje Arduino prima prikazati u Processingu u obliku grafikona. Ti podaci mogu dolaziti od senzora, motora, kamera, svjetala i gotovo bilo čega što se može upravljati sa električnim signalom. U ovome leži veliki potencijal za povezivanje ogromnog područja softvera i elektronike. Ovaj rad bi mogao biti koristan onome tko se počinje baviti Arduinom. Važno je napomenuti da su Arduino mikrokontroleri i Processing open-source tipa, što znači da su ljudima vrlo dostupni i praktički besplatni. Zapravo bi svatko tko ima pristup internetu i neka osnovna znanja o programiranju mogao koristiti tu tehnologiju. Smatram da je to izuzetno korisno za daljnji razvoj elektronike, ali i za razvoj aplikacija i raznih grafičkih sučelja.

LITERATURA

- [1] en.wikipedia.org/wiki/Hard_water
- [2] www.ciklidi.com/akvarij/voda/voda.shtml
- [3] www.uredidom.com/Portals/0/CLANCI_FOTO/Uradi_sam/kamenac_03.jpg
- [4] hr.wikipedia.org/wiki/Omek%C5%A1avanje_vode#cite_ref-2
- [5] erwo.hr/proizvodi/zastita-od-kamenca/wellan
- [6] Halasz B., Zbirka zadataka iz uvoda u termodinamiku, FSB, Zagreb 2009.
- [7] Gryta M., The influence of magnetic water treatment on CaCO₃ scale formation in membrane distillation process, ELSEVIER, 2011
- [8] www.ed2000.net/york/detailed.htm
- [9] www.stemark.hr/
- [10] hr.wikipedia.org/wiki/Zvuk
- [11] www.ndt-ed.org
- [12] Predavanja, FER, Ultrazvucna dijagnostika, 2007
- [13] Predavanja, Gradevinski fakultet, Ultrazvucna kontrola, 2012
- [14] Predavanja FER, Ultrazvuk i hidroakustika, elektroakustika 2007
- [15] hr.wikipedia.org/wiki/Ultrazvuk
- [16] www.ctgclean.com/
- [17] Mustapic N., Intenzifikacija procesa proizvodnje biodizela pomocu kavitacije, Rijeka 2012
- [18] Drmic H., Jambrak A., Ultrazvucna ekstrakcija bioaktivnih spojeva, Sveucilište u Zagrebu, PBF, 2010.
- [19] Franc J.P., Michel J.M., Fundamentals of cavitation, Kluwer academic publisher, New York, 2004.
- [20] Brennen C. E., Cavitation and bubble dynamics, Oxford University Press 1995.
- [21] en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_cleaning
- [22] www.ydaultrasonic.com/
- [23] en.wikipedia.org/wiki/Arduino
- [24] arduino.cc/en/
- [25] Timmis H., Practical Arduino Engineering, National Instruments, 2011

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Električna shema pločice za galvansko odvajanje